

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TERMODİNAMİK BİLİM DALI**

**HELİSEL DİKEY EKSEN BİR RÜZGAR TÜRBİNİNİN
BELİRLİ TASARIM KRİTERLERİ ALTINDA
PERFORMANSININ İNCELENMESİ**

Ahmet ÖZEKES

**Danışman
Dr. Öğretim Üyesi Yiğit AKSOY**



MANİSA-2019

TEZ ONAYI

Ahmet ÖZEKES tarafından hazırlanan "**Helisel Dikey Eksen Bir Rüzgar Türbininin Belirli Tasarım Kriterleri Altında Performansının İncelenmesi**" adlı tez çalışması 27/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde **Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Jüri Üyesi

Dr. Öğretim üyesi Yiğit AKSOY

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Dr. Öğretim Üyesi Ali YURDDAŞ

Manisa Celal Bayar Üniversitesi

Jüri Üyesi

Dr. Öğretim Üyesi Serdar KARAOĞLU

Ege Üniversitesi

TAAHHÜTNAME

Bu tezin, Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı kriterlerine, akademik ve etik kurallarına uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm kaynakların referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Ahmet ÖZEKES



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	II
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IV
TABLO DİZİNİ.....	VI
TEŞEKKÜR.....	VII
ÖZET.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGAR VE RÜZGAR ENERJİSİ.....	7
2.1. Rüzgar Enerjisinin Yararları.....	8
2.2. Rüzgar Enerjisinin Zararları.....	8
2.3. Rüzgar Enerjisinin Çevresel Etkileri.....	9
2.4 Türkiye Rüzgar Atlası.....	10
2.5 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli.....	12
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ.....	19
3.1. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması.....	19
3.2. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	20
3.2.1. Rüzgarı Karşıdan Alan Türbinler.....	20
3.2.2. Rüzgarı Geriden Alan Türbinler.....	21
3.3. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri	21
3.4. Rüzgar Türbinlerinin Malzemesi, Ömrü, Bakımı ve Güvenliği.....	22
3.5. Bir Rüzgar Türbininde Güç ve Kontrol Sistemleri.....	24
3.5.1. Durma Kontrollü Türbinler.....	25
3.5.2. Kanat Açısı Kontrollü Türbinler.....	25
3.5.3. Aktif Durma Kontrollü Türbinler.....	26
3.6. Rotor Hızına Göre Türbinlerin Sınıflandırılması.....	27
3.6.1. Sabit Rotor Dönüş Hızlı Türbinler.....	27
3.6.2. Değişken Rotor Dönüş Hızlı Türbinler.....	28
4. RÜZGAR TÜRBİNİ KANADINA ETKİYEN KUVVETLER.....	29
4.1. Rüzgar Türbininde Güç.....	29
4.2. Türbin Kanadının Tasarımı.....	29
4.2.1. Kalınlık Oranı.....	30
4.2.2. En Büyük Kalınlık Noktası Konumu.....	31
4.2.3. Kamburluk Oranı.....	31
4.3. Türbin Kanadına Etkiyen Kuvvetler.....	32
4.4. Gorlov Türbini.....	33
5. TÜRBİN KANADI MODELLEME VE SAYISAL ANALİZ.....	41
5.1. Türbin Kanatlarının Çizimi.....	43
5.2. Türbin Kanatlarının QBlade Yazılımında Analizi.....	49
5.3. Türbin Kanat Geometrisi Parametrelerinin Performansa Etkisi.....	57
6. GORLOV TÜRBİNİ İMALATI	62
6.1. Gorlov Türbin Kanatlarının Yapısal Analizi.....	62
6.2. Gorlov Türbin Kanatlarının İmalatı.....	68
7. SONUÇLAR.....	72
KAYNAKLAR.....	74
ÖZGEÇMİŞ.....	76

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Alan
BEM	Blade Element Momentum (Kanat Elemanı Momenti)
c	Kiriş Uzunluğu
CAD	Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CAM	Computer Aided Machining (Bilgisayar Destekli Üretim)
CD	Drag Coefficient (Sürüklenme Katsayısı)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
CL	Lift Coefficient (Kaldırma Katsayısı)
C_p	Güç Katsayısı
D	Çap
DMS	Double Multiple Stream Tube Algorithm
E	Young Modülü
H	Yükseklik
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine (Yatay Eksen Rüzgar Türbini)
LLT	Lifting Line Theory
n	Kanat Sayısı
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics (Ulusal Havacılık Danışma Kurulu)
P	Güç
Q	Debi
R	Yarıçap
Re	Reynolds Sayısı
t	Zaman
T	Tork
TSR	Tip Speed Ratio (Uç Hız Oranı)
UIUC	University of Illinois at Urbana–Champaign (Urbana–Champaign Illinois Üniversitesi)
V	Hız
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine (Dikey Eksen Rüzgar Türbini)
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program (Rüzgar Atlası Analiz ve Uygulama Programı)

α	Çarpma Açısı
δ	Kanat Helis Yükselme Açısı
θ	Kanat Helis Dönme Açısı
λ	Uç Hız Oranı
σ	Katılık Oranı
ω	Açısal Hız
ρ	Yoğunluk
μ	Poisson Oranı



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Dikey Eksen Rüzgar Türbini.....	1
Şekil 1.2. Dikey Eksen Rüzgar Türbini Çeşitleri.....	2
Şekil 1.3. Helisel Kanatlara Sahip Dikey Eksen Rüzgar Türbini.....	3
Şekil 2.1. Türkiye Rüzgar Atlası.....	11
Şekil 2.2. Türkiye'deki İşletmedeki Rüzgar Elektrik Santralleri.....	12
Şekil 2.3. Türkiye Rüzgar Güç Yoğunluğu Haritası (h=50 m için).....	15
Şekil 2.4. Türkiye Rüzgar Hızı Haritası (h=50 m için).....	15
Şekil 2.5. Türkiye Rüzgar Güç Yoğunluğu Haritası (h=100 m için).....	16
Şekil 2.6. Türkiye Rüzgar Hızı Haritası (h=100 m için).....	16
Şekil 2.7. İzmir Rüzgar Hızı Haritası (h=50 m için).....	17
Şekil 2.8. İzmir Kapasite Faktörü Dağılımı (h=50 m için).....	17
Şekil 2.9. İzmir Rüzgar Enerjisi Santrali Kurulabilir Alanlar.....	18
Şekil 3.1. Rüzgar Türbinlerinin Elemanları.....	19
Şekil 3.2. Pitch ve Stall kontrollü Türbinlerin Güç Eğrisi.....	27
Şekil 4.1. Kanat Profili Geometrisi.....	30
Şekil 4.2. Türbin Kanadına Etkiyen Kuvvetler.....	32
Şekil 4.3. Gorlov Türbini Tasarımı.....	35
Şekil 5.1. NACA 0018 Kanat Profili.....	43
Şekil 5.2. NACA 0018 Kanat Profili Koordinatları.....	44
Şekil 5.3. Solidworks Programında NACA 0018 Kanat Profili Çizimi.....	45
Şekil 5.4. Gorlov Türbin Kanadı Helis Tasarımı.....	46
Şekil 5.5. Gorlov Türbin Kanadı Helis Eğrisinin Koordinatları.....	47
Şekil 5.6. Gorlov Türbin Kanadı Helis Eğrisinin Çizimi.....	48
Şekil 5.7. Gorlov Türbin Tasarımı.....	49
Şekil 5.8. Türbin Kanatlarında Durma (Stall) Oluşması.....	52
Şekil 5.9. QBlade Programında NACA 0018 Profil Seçimi.....	54
Şekil 5.10. QBlade Programında CL ve CD Değişimleri.....	55
Şekil 5.11. QBlade Programında 360° için CL ve CD Değişimleri.....	55
Şekil 5.12. QBlade Programında Türbin Kanat Tasarımı.....	56
Şekil 5.13. QBlade Programında DMS Simulasyon Sonuçları.....	57
Şekil 5.14. Farklı Kanat Yükseklik (H) Değerlerindeki Türbinlerin Güç – Rüzgar Hızı İlişkisi.....	58
Şekil 5.15. Farklı Türbin Yarıçapı (R) Değerlerindeki Türbinlerin Güç – Rüzgar Hızı İlişkisi.....	58
Şekil 5.16. Farklı Kanat Kiriş Uzunluğu (C) Değerlerindeki Türbinlerin Güç – Rüzgar Hızı İlişkisi.....	59
Şekil 5.17. Farklı Kanat Sayısına Sahip Türbinlerin Güç–Rüzgar Hızı ilişkisi	61
Şekil 6.1. Comsol Yazılımına Türbin Çiziminin Aktarılması.....	63
Şekil 6.2. Comsol Yazılımında Türbin Kanatlarının Ağ Dağılımı.....	64
Şekil 6.3. Comsol Yazılımında Türbin Kanatları Etrafındaki Hız Dağılımı.....	66
Şekil 6.4. Comsol Yazılımında Türbin Kanatları Etrafındaki Basınç Dağılımı.	67
Şekil 6.5. Türbin Kanatları Üzerindeki Von Mises Gerilimi Dağılımı.....	68
Şekil 6.6 CNC 5 Eksen Tezgahı (Hermler C250).....	69
Şekil 6.7 CNC 5 Eksen Tezgahı Üzerinde Kanat Formu İşleme.....	69
Şekil 6.8 Kanat Profili ve Alüminyum Kaba Silindir Blok.....	70
Şekil 6.9 Türbin Prototip Üretim Modeli.....	71
Şekil 6.10 3D Printer Türbin Prototipi.....	71

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. İzmir’de Kurulabilir Rüzgar Enerjisi Tesisi Güç Kapasitesi.....	18
Tablo 5.1. Gorlov Türbin Tasarım Değerleri.....	45
Tablo 5.2. Dikey Eksen Rüzgar Türbinlerinin Kanat Geometri Ölçüleri.....	57



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlık aşamasında bana bilgi ve birikimi ile destek olan, tecrübe ve deneyimleri ile ışık tutan danışman hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Yiğit AKSOY'a, ayrıca birikimi ve manevi desteğini esirgmeden paylaşan arkadaşım Makine Mühendisi Dr. Özer ÖĞÜÇLÜ'ye ve hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve bugüne kadar gelmemde büyük emeği geçen aileme yürekten teşekkür ederim.

Ahmet ÖZEKES
İzmir, 2019



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

**Helisel Dikey Eksen Bir Rüzgar Türbininin
Belirli Tasarım Kriterleri Altında Performansının İncelenmesi**

Ahmet ÖZEKES

**Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Yiğit AKSOY

Bu çalışmada rüzgar hızının kanatlar üzerinde yol açtığı kaldırma kuvvetini, açısal hız ve momente çevirecek dikey eksen bir rüzgar türbini olan helisel tipteki Gorlov tipi bir türbin geliştirilecektir. Ayrıca geliştirilecek Helisel tipteki rüzgâr türbinin; Türbin boyu, Kanat profili, Kanat boyutları, Hücüm açısı, Helis açısı, Kanat sayısı ve Kanat yerleşimleri olarak verilen tasarım kriterlerinde değişikliğe gidilerek sayısal çözümler yardımı ile performansının en iyi hale getirilmesi amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Helisel Dikey Eksen Rüzgar Türbini, Gorlov Tipi, Sayısal Modelleme

2019, 87 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Performance Analysis of a Helical Wind Turbine For Different Design Parameters

Ahmet ÖZEKES

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Dr. Yiğit AKSOY

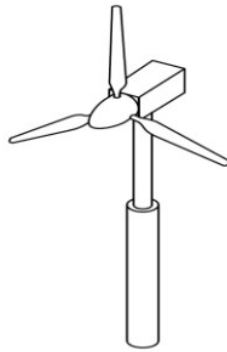
In this study, a Gorlov type helical vertical axis wind turbine will be developed to turn the buoyancy force caused by the wind velocity on the wings to the angular velocity and torque. This helical vertical axis wind turbines will also be developed with several parameters such as turbine length, blade profile, blade dimensions, angle of attack, helix angle, number of blades and blade settlements. These parameters are designed to optimize the performance criteria and to optimize their performance with the help of numerical solvers.

Keywords: Helical Vertical Axis Wind Turbine, Gorlov type, Numerical Modelling

2019, 87 pages

1. GİRİŞ

Fosil yakıtların aşırı kullanımı, kötü çevresel etkileri ve gelecekte bitecek olmaları nedeni ile insanlığın ilgisi yenilenebilir enerji kaynaklarına kaymıştır. Özellikle Rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından olan Güneş enerjisi ile karşılaştırıldığında, günün her saatinde kullanılabilir olduğundan oldukça avantajlı durumdadır. Ancak geleneksel rüzgar türbinlerinin hareketli parçalarının oldukça fazla olması; tasarım, bakım ve işletme maliyetlerini oldukça arttırmaktadır. Bunlara bir de çevremizde gördüğümüz devasa boyutlardaki rüzgar türbinlerinin doğal yaşama olan kötü etkisiyle beraber, ses ve görüntü kirliliği de eklenmektedir. Şekil 1.1'de verilen geleneksel tip rüzgar türbinlerinde (Horizontal Axis Wind Turbine - HAWT) rüzgar enerjisini dairesel harekete ve dolayısıyla torka dönüştürecek olan kanatlar türbin gövdesine dik yerleştirilir ve rüzgarı karşıdan alır. Bu durum, rüzgar türbininin ve taşıyıcı platformun tasarım hatalarına ve hatta kırılmalara yol açacak eğilme momentlerine yol açar. Bu durumun önüne geçmek için kritik rüzgar hızlarından sonra türbinler devre dışı bırakılmaktadır. Söz konusu durumlarda ortaya çıkacak yapısal hasarlar geleneksel tipteki tüm rüzgar türbinlerinde boyutlarından bağımsız olarak görülmektedir. Ayrıca bu tipteki rüzgar türbinleri harekete başlamak için rüzgar hızından bağımsız olarak bir ilk hıza ihtiyaç duyar, bunun içinde tasarımda ters çalışabilmesi için ilave dişli ve kavrama ekipmanlarına ihtiyaç duymaktadır [1].



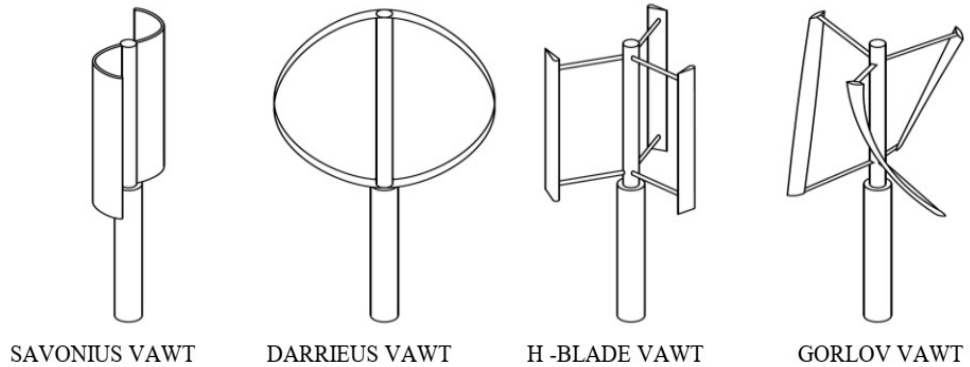
Şekil 1.1. Dikey eksen rüzgar türbini[3]

Geleneksel rüzgar türbinlerinin dezavantajlarını özetlemek gerekirse;

- Karmaşık mekanik yapı,
- Yüksek yatırım, bakım ve işletme maliyetleri,
- Arıza durumunda erken müdahalenin zor olması,
- Hantal yapısından dolayı ses ve görüntü kirliliğine yol açması,
- Çevre hayvan popülasyonuna, özellikle kuşlara olumsuz etkileri,
- Zayıf eğilme direnci,
- Rüzgara bağlı çalışma limitleri,
- Harekete başlayabilmesi için ilk hıza ihtiyaç duyması.

Yine de geleneksel tipteki rüzgar türbinleri yukarıdaki dezavantajlarına rağmen, yüksek güç üretme kapasiteleri göz önüne alındığında endüstriyel kullanım ya da şehir şebekeleri destekleme bakımından kullanımları oldukça fazladır.

Kullanım amacına göre kompakt, basit ve düşük güç gereken durumlarda (led ışıklar, trafik tabelaları, kamp cihazları, yat, tekne, müstakil evler gibi) dikey eksen rüzgar türbinleri (Vertical Axis Wind Turbine – VAWT), geleneksel türbinlerin çoğu dezavantajını taşımaz[2]. Şekil 1.2.'de verilen dikey eksen rüzgar türbinlerinde hava rüzgar türbin kanatlarına paralel olarak geçtiğinden türbinlerinin dengesi ve dayanımı HAWT türbinlerine göre oldukça yüksektir[3]. Ayrıca jenaratöre bağlanacak mil ve dişli kutularının ağırlıkları, taşıyıcıya eksene yerleştirileceğinden eğilme momentlerine etkisi oldukça az olacaktır.



Şekil 1.2. Dikey eksen rüzgar türbini çeşitleri[3]

Dikey eksen rüzgar türbinleri, rüzgar hızının basıncını (Savounius) ve kaldırma kuvvetini (Darrieus, H-kanat, Gorlov-helisel) kullananlar olarak ikiye ayrılabilir. Bu tez kapsamında rüzgar hızının kanatlar üzerinde yol açtığı kaldırma kuvvetini açısız hız ve momente çevirecek dikey eksen bir rüzgar türbini olan helisel tipteki Gorlov tipi bir türbin [4] geliştirilecektir. Hafif ve nispeten küçük yapısı ile bu tarz bir rüzgar türbininden kritik durumlarda herhangi bir yerin veya konutun anlık enerji ihtiyacının karşılanması beklenmektedir. Türbin kanatlarının helisel bir profili izleyerek türbin boyunca ilerlemesi türbinin ilk hızsız çalışmasını sağlamaktadır. Şekil 1.3.'te verilen Helisel yapının diğer kaldırma kuvvetini kullanan dikey eksen rüzgar türbinlerine göre avantajı ilk harekete ya da hıza ihtiyaç duymamasıdır. Üzerinde çalışılacak rüzgar türbinin bir takım tasarım kriterleri üzerinde değişikliğe gidilerek performansının en iyi hale getirilmesi amaçlanmaktadır.



Şekil 1.3. Helisel kanatlara sahip dikey eksen rüzgar türbini

Dikey eksen rüzgar türbinlerinin avantajlarını özetlemek gerekirse;

- Basit mekanik yapı,
- Ucuz yatırım, işletme ve bakım maliyetleri,
- Arıza durumunda erken müdahale,
- Estetik yapı,
- Sessiz çalışma,
- Kuvvetli eğilme direnci,
- Yüksek rüzgar hızlarında çalışma,

• Çalışmaya başlamak için ilk hıza ihtiyaç duymama (sadece helisel tip)
maddeleri sıralanabilir. Dikkat edilirse geleneksel tipin dezavantajlarının burada hiç birine rastlanmamıştır. Ancak;

- Düşük güç üretimi
- Karmaşık tasarım
- Oldukça fazla tasarım parametresi
- Helisel kanatların imalatı

dezavantajları ise dikey eksen türbinlerinin dezavantajları olarak verilebilir.

Bu çalışmada Helisel bir tipteki rüzgar türbinin aşağıdaki verilen tasarım kriterlerinde değişikliğe giderek, sayısal çözümler yardımı ile performansı incelenecektir. Söz konusu kriterler şu şekildedir;

- Türbin boyu
- Kanat profili
- Kanat boyutları
- Hücüm açısı
- Helis açısı
- Kanat sayısı
- Kanat yerleşimleri

Yukarıdaki kriterlere göre tasarlanan bir helisel rüzgar türbininin çalışması için gereken en iyi şartlar analizler sonucu belirlenecektir. Bu sayede yeni bir rüzgar türbini geometrisi elde edilmesi planlanmaktadır. Yapılacak analizler rüzgar türbininin imalatı konusunda bir ön hazırlık olacaktır. Bulunacak sonuçlar deneysel çalışmalara ışık tutacaktır. Yeni benzersiz bir tasarım hedeflenmektedir. Mevcut tasarımların çoğu ilk hıza ihtiyaç duymaktadır. İlk hıza ihtiyaç duymayacak birden fazla tasarım özelliğinin arasından en iyisi bulunmaya çalışılacaktır.

Rüzgar enerjisi dönüşümü son otuz yılda dünya çapında önemli bir büyüme yaşamıştır. Bu başarı, şu anda tartışmasız pazar lideri olan Yatay Eksenli Rüzgar

Türbini (HAWT) teknolojisinin gelişimi ile desteklenmiştir. Bununla birlikte, kıyıdan uzak deniz alanları gibi yeni ortamlarda rüzgar enerjisine olan ilgi, alternatif türbin teknolojisi üzerine yeni araştırma faaliyetlerine yol açmıştır. Bu durumlarda kullanılmak üzere, yalpa açısına duyarsızlık, düşük uç hızı oranları nedeniyle düşük gürültü ve büyük türbinler için, mekanik ve elektrikli ağır parçaların zeminde konumlandırılması gibi birçok avantajlar sunan kaldırma kuvveti ile çalışan Dikey Eksenli Rüzgar Türbini (VAWT) teknolojisi önem kazanmıştır. Dikey Eksenli Rüzgar Türbini teknolojisi daha önce rüzgar enerjisi uygulamaları için araştırılmıştır. En göze çarpan tür, 1980'lerde çok fazla dikkat çeken çeşitli matematiksel şekilleri olan kanatlı Darrieus türbini idi. Genel VAWT tasarım kriterlerinin oluşturulmasında bir karmaşıklık getiren çok sayıda VAWT mimarisi (helisel kanatlı, H şeklinde, V şeklinde, Troposkien şeklinde ve Gorlov tipi gibi) vardır. Darrieus rüzgar türbininin, 1931'de Troposkien, H ve V şeklindeki rotorlarla, G.J.M. Darrieus tarafından patenti alınmıştır, ancak hem aerodinamik hem de yapısal performansları optimize etmek amacıyla diğer kanat geometrileri geliştirilmiştir. 1980'lerin sonunda bu düz kanatlı dikey eksenli rüzgar türbinlerinin gelişimi esasen terk edildi. Kanatın açılma açısı dönme boyunca değiştiğinden, kaldırmadaki büyük değişiklikler nedeniyle, torktaki büyük değişiklikler türbinlerin yapısal yorulma arızalarına neden oldu. Bu nedenle kavisli kanat şekli esas olarak büyük türbinlerde kullanılmıştır. Bu mimarinin önemli bir aerodinamik dezavantajı, kanatların düşük çevresel hızları gördüğü ve bu nedenle çok az tork ürettiği, rotorun tepesine ve altına yakın olan azalan yarıçaptır. Bu sınırın üstesinden gelmek için 1986 yılında farklı bir konsept ortaya kondu ve ilk H-Darrieus veya Musgrove VAWT prototipi geliştirildi. Bu tasarımda, kanatlar düzdür ve bu nedenle yarıçap, kanatın tüm uzunluğu boyunca aynıdır. Darrieus türbini, genellikle her dönme döngüsü boyunca aerodinamik kuvvetlerin periyodik olarak değişmesiyle karakterize edilir. Ortaya çıkan titreşimli yüklerden kurtulmanın basit bir yöntemi olan kanatları eğmek, 1990'ların ortasında A.M. Gorlov tarafından önerildiği gibi, rüzgar enerjisi kullanımına adapte edilmiş ve deniz uygulamaları için patentli olan helisel şekilli bir Darrieus türbin tasarımına yol açmıştır[5]. 1995 yılında Alexander Gorlov, kanatları helisel olarak süpürülerek dikey kanatlı bir türbin tasarladı ve düz kanatlı konseptte bağlı periyodik olarak kararsız torkları dengeledi. Gorlov Helisel Türbinleri, düz uçlu benzerlerine kıyasla pratik olarak iki boyutta aynıdır. Sonuç

olarak, Darrieus türbini performans modelleri ve deneysel gözlemler önemlidir. Bugüne kadar elde edilen literatürdeki helisel türbinler için performans verisi azlığı vardır. Mevcut sınırlı bilgi Gorlov Helisel Türbinlerinin % 35'e varan verimliliklere ulaştığını göstermektedir.

Dikey Eksenli Rüzgar Türbinlerinin aerodinamiği ve doğal olarak kararsız akış alanlarını incelemek için birkaç yaklaşım vardır. Bir yaklaşımın bir uygulama için uygun olup olmadığını belirlemek için toplam maliyet, zamandaki yatırım ve doğruluk gibi çeşitli kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Gerçek akış fiziğini araştırmak için gerekli olan deneysel çalışmalar her zaman bu amaç için yapılmıştır.

Bununla birlikte, deneysel çalışmalar özellikle akış görselleştirme amaçları için son derece zaman alıcı ve pahalıdır. Güvenilir bir sonuç elde etmek için, özellikle incelenen modelde karmaşık akış veya geometri varsa, dikkate alınması ve karşılanması gereken çok sayıda faktör ve koşul vardır. Dikey eksenli rüzgar türbinleri karmaşık, kararsız ve türbülanslı akış alanlarıyla karakterize edildiğinden, araştırmacılar her zaman bu türbinlerin performansını düşük maliyetlerle tahmin edebilecek sayısal veya analitik modeller sunmaya çalışırlar. Bu modeller üç ana kategoridedir: Blade Element Yöntemleri, Vortex yöntemleri ve Navier-Stokes (grid) yöntemleri. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinlerinin performansını simüle etmek için çeşitli sayısal modeller geliştirilmiştir. Islam ve diğ. (2008), gelişim tarihi de dahil olmak üzere yaygın modelleme tekniklerinin mükemmel bir özetini sunmaktadır[6]. Bu çalışmada, Dikey Eksenli Rüzgar türbininin, ilk önce QBlade yazılımı ile aerodinamik performans analizi incelenmiş ve daha sonra Solidworks programı ile tasarımı yapılmıştır. QBlade, rüzgar türbinlerinin simülasyonu için Blade Element Momentum (BEM) yöntemini kullanır ve XFOIL kanat profili tasarımı ve analizi ile entegre edilmiştir. Rüzgar türbininin aerodinamik performansını deneysel, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve Blade Element Momentum (BEM) yöntemleri kullanarak tahmin etmek mümkündür. Deneysel ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemleri daha pahalıdır ve Blade Element Momentum (BEM) yönteminden daha uzun sürer. Ancak, BEM yöntemi bazı varsayımlar nedeniyle deneysel ve CFD yöntemlerinden daha az kesinliğe sahiptir.

2. RÜZGAR VE RÜZGAR ENERJİSİ

Rüzgarın tanımını şu şekilde yapabiliriz; yüksek basınç hattından alçak basınç hattına geçen havanın dünya düzlemine göre yaptığı bağıl hareket. Ayrıca dünyanın dönmesi sonucu oluşan Coriolis kuvveti de yer değiştiren havanın kütesine etki eder.

Havada oluşan basınç farkının nedeni; sıcak hava ile soğuk hava arasında oluşan geçiştir. Hava, ısınarak yükselip alçak basınç etkisini oluştururken, tam aksi durum olan soğuması sonucu da, yüksek basınç etkisi meydana gelir. Bu iki akımın birbiriyle buluşması sonucu rüzgar oluşur. Ayrıca, alçak basınç ile yüksek basınç dengelendiğinde ise rüzgar durur.

Güneşin oluşturduğu enerjinin, rüzgar enerjisine dönüşmesine etkisi yaklaşık olarak %1–2 seviyesindedir. Kısaca, rüzgar enerjisi, güneş enerjisinin kinetik enerjiye dönüşmüş halidir diyebiliriz. Rüzgar enerjisi ile enerji üretimi, prensip olarak rüzgarın itme kuvveti yardımıyla oluşan bir enerji türüdür.

Rüzgar enerji santrallerinin kurulumunda, en önemli parametre yer seçimidir. İklimin ve jeolojik konumun önemide yadsınamaz bir gerçektir. Rüzgarın gücünü şu şekilde hesaplamak mümkündür. Burada Q kütleli debi, V ise hız parametresi olarak kullanıldığında rüzgarın gücü;

$$P = \frac{1}{2} Q V^2 \quad (2.1) \text{ dir. Debi bağıntısı; } Q = \rho A V \text{ formülde kullanıldığında ;}$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (2.2) \text{ güç değerini elde etmiş oluruz.}$$

Burada, $P(W)$ = güç, $A(m^2)$ = pervanenin taradığı alan, $V(m/s)$ = rüzgar hızı ve $\rho(kg/m^3)$ = havanın yoğunluğudur.

Bu denklem ile rüzgar enerjisinin aslında, rüzgarın hızının küpü ve bu hızla dik olan alanla, doğru orantı ile bağılı olduğu rahatlıkla görülmektedir. Burada ana etken rüzgarın hızıdır. Rüzgar hızı ne kadar fazla ise, bu hızdan yararlanarak enerji üreten sisteminde verdiği enerji, o kadar fazla olur demektir.

2.1. Rüzgar Enerjisinin Yararları

Normal şehir şebeke hatlarının ulaşamadığı yerleşim yerlerinin veya deniz ulaşım araçlarının ihtiyacı rüzgar enerjisi ile rahatlıkla karşılanabilir. Rüzgar enerjisi doğada herhangi bir kaynak kullanımına ihtiyaç olmadan varolan bir enerjidir. Rüzgar türbinleri karmaşık yapılı makineler gibi değildir. Aksine basit yapısal parçalardan oluşmaktadır. Ayrıca herhangi bir operatör veya kullanıcıya ihtiyaç duyulmadan, kurulduğu andan itibaren enerji üretebilecek şekilde tasarlanmış enerji kaynağıdır. Belirli aralıklarla periyodik bakımlarının yapılması ile uzun yıllar çalışabilme kabiliyetindedirler. Rüzgar türbinleri doğaya zarar verebilecek gaz veya radyasyon yaymazlar. Bu nedenle tehlikeli değildirler. Montaj ve bakım esnasında işgüvenlik kurallarına uyulması halinde kaza riski ve bu sebeple oluşabilecek kayıplar da yok denebilecek kadar azdır. Yine de rüzgar türbini kazası sonucu ölüm riski %0,0006 gibi bir rakamdır. Rüzgar türbinleri, diğer fosil yakıtlar da olduğu gibi enerji üretimi sırasında artan fiyat ve maliyet gibi unsurlardan izoledir. Atmosfere veya su kaynaklarına zarar verecek ısı emisyon üretmezler. Ayrıca kullanım esnasında atık üretmezler. Tamamen yerel kaynaklar kullanılarak üretilen ekipmanlar olduğundan binlerce insana işgücü imkanı sunmuştur. Rüzgar türbinleri modülerdir ve taşıma işlemi istendiği takdirde kısa sürede taşınabilir yapılardır. Ayrıca rüzgar türbinlerinin kullanıldığı alanlar istendiğinde tekrar eski halinde kullanılabilir. Genellikle kırsal ve açık bölgelerin seçildiği alanlar yöre halkının da bu durumdan karlı çakabileceği anlamına gelmektedir. Rüzgar türbinleri, kurulu olduğu alanların yanında herhangi bir tarımsal faaliyetin yapılmasına mani olmadığından, ekonomik anlamda kurulduğu bölge de negatif bir etki oluşturmamaktadır. Özellikle Dikey Eksen Rüzgar Türbini (VAWT) daha küçük yapıları ile deniz ulaşım araçları, ev kullanıcıları gibi mikro ölçekli kullanıcılara hitap edebileceğinden, oldukça ekonomik ve kullanışlı yapılardır.

2.2. Rüzgar Enerjisinin Zararları

Özellikle Yatay Eksen Rüzgar Türbinleri (Horizontal Axis Wind Turbine) başta olmak üzere, rüzgar türbinlerindeki en büyük sorun, gürültü olarak karşımıza çıkmaktadır. Gürültü sebebi rüzgarın kanat üzerinde oluşturduğu türbülans sonucu

olabileceği gibi dişli sistemleri, fren mekanizmaları ve hidrolik motor sistemlerinden kaynaklı olabilmektedir. Bu nedenle İngiltere’de milli parklar bölgesinde, max 10 türbin veya 5 MW güç üretimi üzerinde sınırlandırma getirilmiştir. Fakat bu gürültü seviyesi iki kişinin sesini yükseltmeden konuşabileceği ve birbirini duyabileceği seviyenin çok üzerinde değildir. Başka bir dezavantajlı durum olarak özellikle kuş ölümlerini söyleyebiliriz. Bunun sebebi kuşların göç bölgesinde yoğun olan rüzgar türbinlerinin olmasından kaynaklıdır. Fakat birçok göçmen kuş 150 metreden yüksekte uçtuğundan bu durumu çok rastlanabilecek bir tehlike olmaktan çıkarmaktadır. Bu nedenle türbinleri kurarken göç bölgesi dışında bir bölgenin seçimi en ideal çözümdür. Diğer bir sorun ise elektromanyetik akımın oluşturduğu etkidir. Bu da radyo, televizyon ve telsiz frekanslarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durumda yapılabilecek şey verici istasyonları yakınında türbin kurulumunun önüne geçmektir. Ayrıca metal malzeme kullanılan türbin kanatları bu etkiyi artırdığından polyster veya karbon fiber malzemedan yapılacak olan kanat imalatıyla elektromanyetik etkinin önüne geçilebilir.

Rüzgarın değişken hızlarda esmesi santralin yer seçiminin ne kadar önemli olduğunu bize göstermektedir. Bunun sonucu olarak istenilen yere rüzgar santrali kurulumu çok efektif değildir. Bu nedenle kurulum yeri doğru seçilmeli ve elde edilen enerji depolanmalıdır. Son yıllarda rüzgardan elde edilen enerjinin doğrudan şehir şebekesine aktarımı, olası depolama sorununu çözüme kavuşturmuştur.

Rüzgar türbini kurulumunda ki diğer bir sorun, uygun arazi bulunsa dahi, bu bölgenin sit alanı olması veya arazi sahibinden yüksek bedel ödeyerek alınması ya da kamulaştırılmasıdır. Ayrıca bazı ekipmanların yurtdışı kaynaklı olması ve ithalatı da ayrı bir sorun olarak karşımıza çıkabilmektedir.

2.3. Rüzgar Enerjisinin Çevresel Etkileri

Rüzgar türbinlerinin kullandığı girdi kaynağı yani hammaddesi rüzgar olduğundan, çevreye hiçbir olumsuz etki bırakan gaz veya atık bırakmamaktadır. Ayrıca sistemin su ile soğutulması gibi bir durum söz konusu olmadığından, su kaynaklarına zarar verebilecek bir durumda oluşmaz. Tüm bunlar kritik edildiğinde

sistemden atık madde çıkmaması nedeniyle atıkların imhası gibi bir sorunla da karşılaşılmaz.

Özellikle yatay tip rüzgar türbinlerinin sebep olduğu ve neredeyse çevreye negatif etki olarak söyleyebileceğimiz kuş ölümleri haricinde başka bir etkisi yok denecek kadar azdır. Bu sorun da tasarımsal olarak yapılabilecek bazı değişikliklerle önlenabilir. Örneğin pervane uçlarının renkli olması bu etkiyi biraz olsun azaltabilir. Türbin alanları belirlenirken kuşların göç bölgesine yapılmamasına dikkat edilebilir.

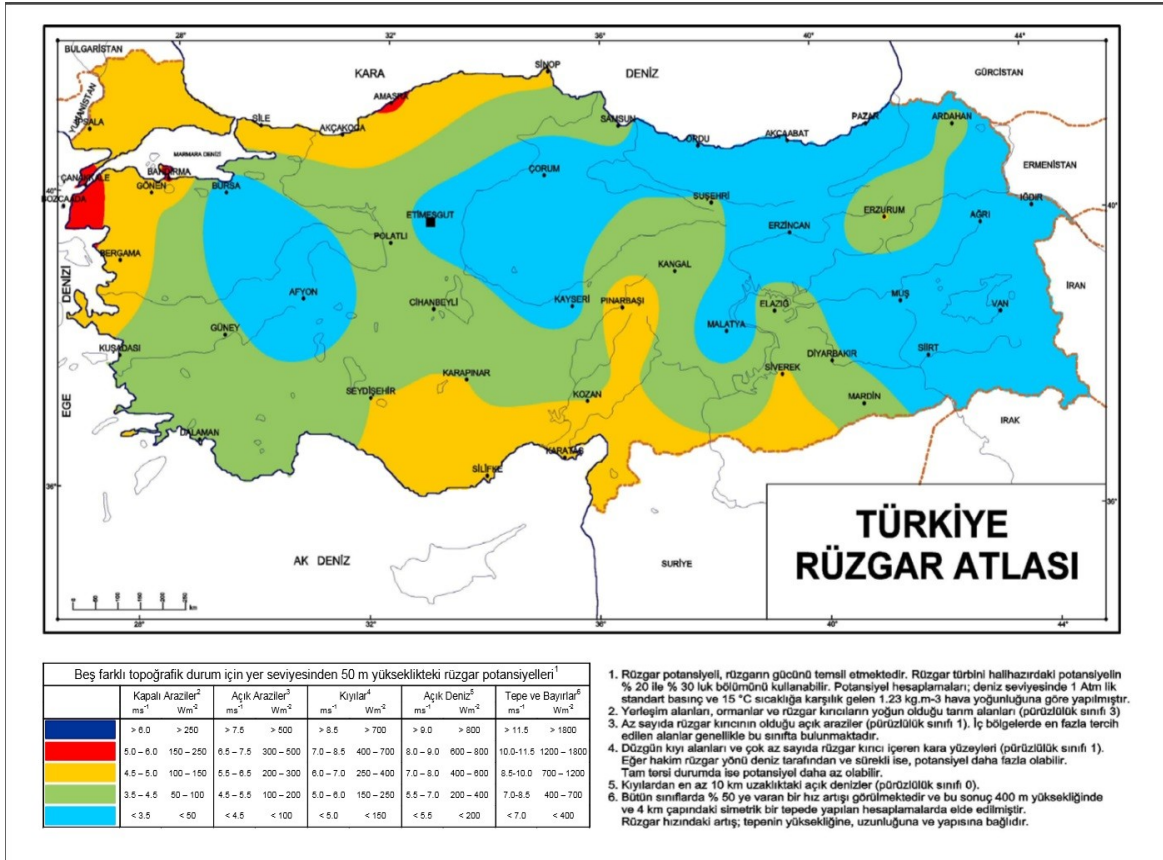
2.4 Türkiye Rüzgar Atlası

Enerji üretimi kalkınma hamlesinin olmazsa olmazıdır. Mevcut enerji kaynaklarının birçoğu çevreye olumsuz etki bıraktığından yenilenebilir enerji kaynakları, bu nedenle ön plana çıkmaktadır. Özellikle petrol krizlerinin varlığı veya bazı ülkelerin tekelinde olduğunu düşünürsek, yenilenebilir enerji kaynaklarının ne kadar önemli bir yere sahip olduğunu söyleyebiliriz. Ayrıca fosil yakıtlar ve yaraltı kaynakları olarak elde edilen diğer enerji kaynaklarının ömründe, rüzgar ve güneş enerjisinin önemini birkez daha vurgulamaktadır.

Türkiye’ de karasal bölgelerde brüt olarak 400 milyar kWh/yıl potansiyel olduğu belirtilmektedir. Buda 160000 MW güce eşdeğerdir. Türkiye’de kıyılarda 8200 MW gücünde potansiyel vardır. Ayrıca Türkiye’nin denizlerinde teknik rüzgar potansiyelinin 60000 MW (150 milyar kWh/yıl) düzeyinde olduğu tahmin edilmektedir. Türkiye’de yıllık rüzgar hızı 8,5 m/s ve üzerinde olan yörelerde en az 50000 MW, 7 m/s’nin üzerindeki bölgelerde ise, en az 48000 MW büyüklüğünde rüzgar enerjisi potansiyeli bulunduğu ifade edilmektedir.

Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü tarafından yapılan çalışmalarda, Rüzgar enerjisi için en uygun bölgelerin Çanakkale ve çevresi ile Ege bölgesinde özellikle Çeşme, Alaçatı ilçelerinin kapsadığı alan olarak belirlenmiştir. Ülkemizde ki ilk Rüzgar Enerjisi yatırımı 1998 yılında İzmir’in Çeşme ilçesinde 8.7 MW olarak gerçekleştirilmiştir. 2000 yılında ise 10.2 MW’lık yatırım Bozcaada’da yapılmıştır.

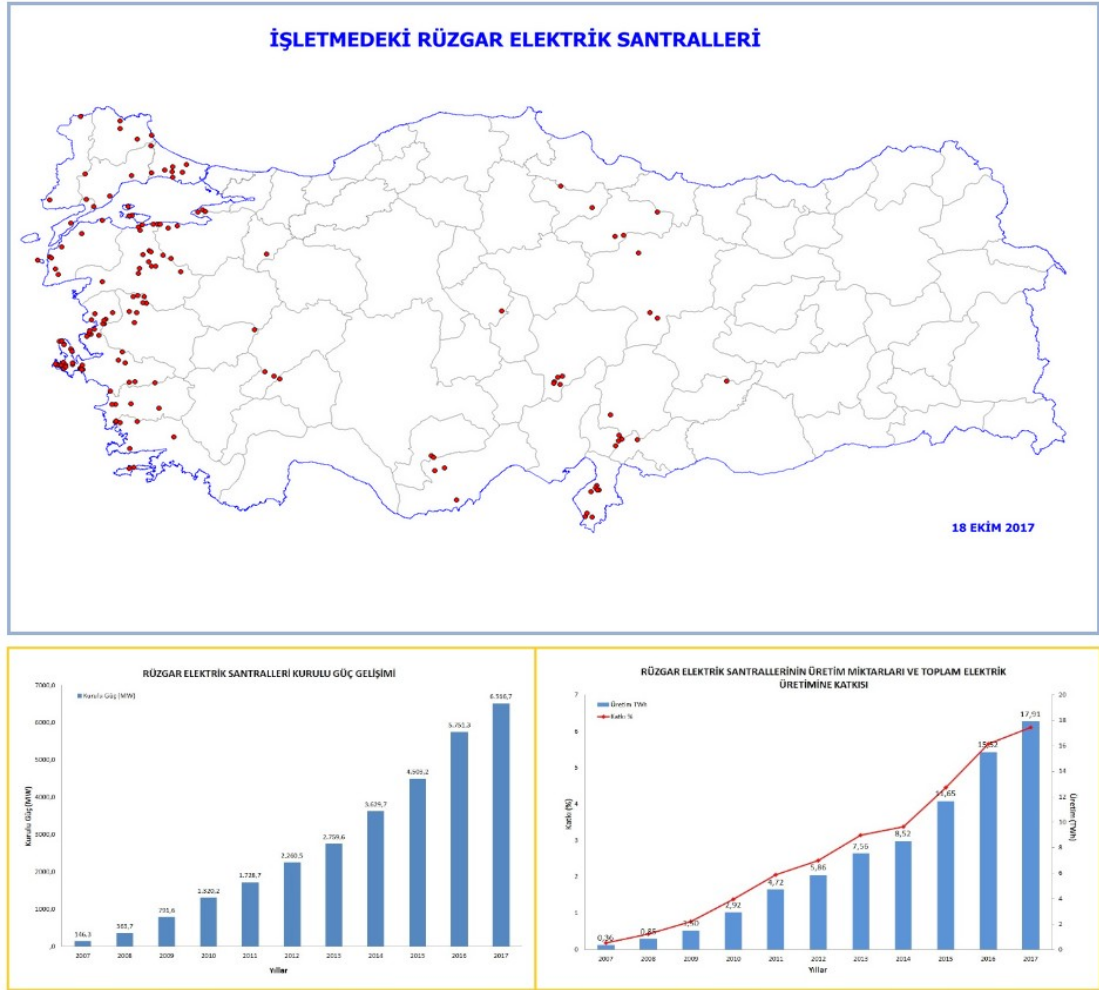
Şekil 2.1.'de Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan Türkiye Rüzgar Atlası görülmektedir[7].



Şekil 2.1. Türkiye rüzgar atlası[7]

Genellikle rüzgar santrali kuracak işletmeler Şekil 2.2 de görüleceği üzere Ege, Akdeniz ve Marmara bölgelerini yoğun olarak tercih etmektedirler. Santraller harita üzerinde de görüleceği üzere nüfusun yoğun olduğu bölgelerde toplanmaktadır. Üç tarafı denizlerle çevrili Türkiye'nin, özellikle rüzgarın daha hızlı estiği deniz üzerinde kurulacak santralleri değerlendirmemiş olması, düşündürücü bir durumdur.

Şekil 2.2.'de Türkiye'deki İşletmedeki Rüzgar Elektrik Santralleri görülmektedir[7].



Şekil 2.2. Türkiye’deki işletmedeki rüzgar elektrik santralleri[7]

2.5 Türkiye Rüzgar Enerjisi Potansiyeli

Rüzgarın oluşumu esnasında meydana gelen etkiler sonucunu 3 temel başlık altında inceleyebiliriz:

- “Rüzgar Enerjisi Doğal Potansiyeli” Rüzgar oluşurken meydana gelen potansiyeldir.
- “Rüzgar Enerjisi Teknik Potansiyeli” Bu potansiyelin eldeki imkanlar ve fizik kuralları dahilinde enerjiye dönüştürülebilen miktarına verilen addır.
- “Rüzgar Enerjisi Ekonomik Potansiyeli” Bu potansiyelin diğer enerji kaynaklarına göre ekonomik olarak kullanılabilen miktarına verilen addır.

Potansiyel belirleme aşamasında iki farklı yöntem kullanılmaktadır;

- Rüzgar santralı kurulması düşünülen bölgede ki rüzgarın hızı, rüzgarın yönü ve rüzgar kayıtlarının tutulması.
- Rüzgar santralı kurulması düşünülen bölgede ki en yakın meteoroloji istasyonunda ölçümler yapıp bulgular neticesinde en uygun coğrafi bölgeye taşınması.

Burada birinci yöntem ile ikinci yöntem kıyaslandığında, daha hassas ve doğru yöntemin ilk yöntem olduğu söylenebilir. Fakat buradaki sıkıntı ölçüm süresinin bir yıl gibi uzun bir süre olması ve her bölge için bu işlemlerin yapılmasının zaman ve maddi yönden mümkün olmaması. Bu nedenle ikinci yöntem uygulama ve maliyet bakımından daha doğru bir tercih olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntem de bilgisayar programı yardımıyla en uygun veriler elde edilerek rüzgar santralinin enerji üretim miktarı öngörülebilmektedir.

Küresel ısınmanın oluşturduğu etkiler, ayrıca fosil yakıtlar dünyada çevreye olan hassasiyetin daha çok artmasına neden olduğundan, yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin de hergün artmasına neden olmuştur. Bu nedenle yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar, sağladığı avantajlar göz önünde bulundurulduğunda daha çok tercih edilmektedir. Bunun sonucu olarakta özellikle ülkeler, hükümetler düzeyinde enerji kaynaklarının kullanımı konusunda dışa bağımlılığın azaltılması için, rüzgar enerjisinin kullanımını daha çok desteklemektedirler.

Rüzgar enerjisi potansiyellerinin tespitinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, oluşturduğu rüzgar atlası istatistiklerini, WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) paket programı kullanarak yapmıştır[7]. Bu program, Danimarka Meteoroloji Teşkilatı'nın Riso Meteoroloji Laboratuvarında hazırlanmıştır.

Türkiye'de yapılan analizlerde, 45 adet meteoroloji istasyonunun 1989–1998 yıllarına ait saatlik olarak ölçülmüş rüzgar değerleri kullanılmıştır. Rüzgar ölçümleri,

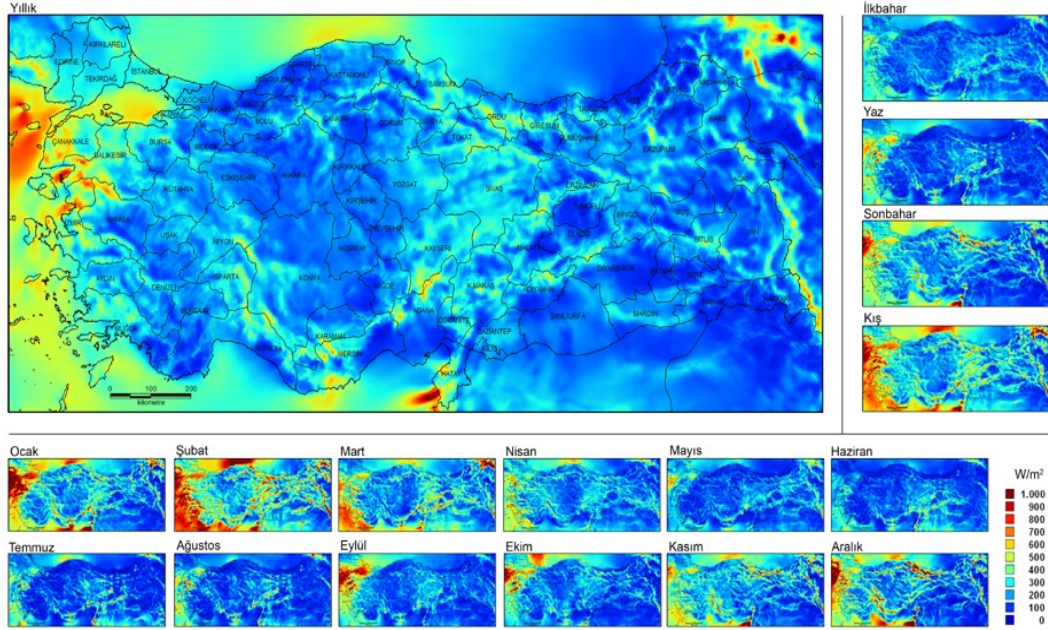
yeryüzünden 10 m yükseklikte yapılmıştır. Ölçüm esnasında rüzgara etki eden ölçüm bölgesi çevresindeki engeller, 1/1.000 ve 1/5.000 ölçekli imar planları dikkate alınarak hesplama işlemine dahil edilmiştir.

Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü veri tabanında ki kayıtlar alınan saatlik ham rüzgar verilerine göre özel olarak bu iş için yazılan bilgisayar programları ile WASP programı kullanılarak hazırlanmıştır.

Şekil 2.3. ve Şekil 2.4.'de 50 m yükseklikte mevsimlere ve aylara göre yıllık Türkiye Rüzgar Güç Yoğunluğu (W/m^2) Haritası ve Türkiye Rüzgar Hızı (m/s) Haritası görülmektedir[7].

Yine Şekil 2.5. ve Şekil 2.6.'de 100 m yükseklikte mevsimlere ve aylara göre yıllık Türkiye Rüzgar Güç Yoğunluğu (W/m^2) Haritası ve Türkiye Rüzgar Hızı (m/s) Haritası görülmektedir[7].

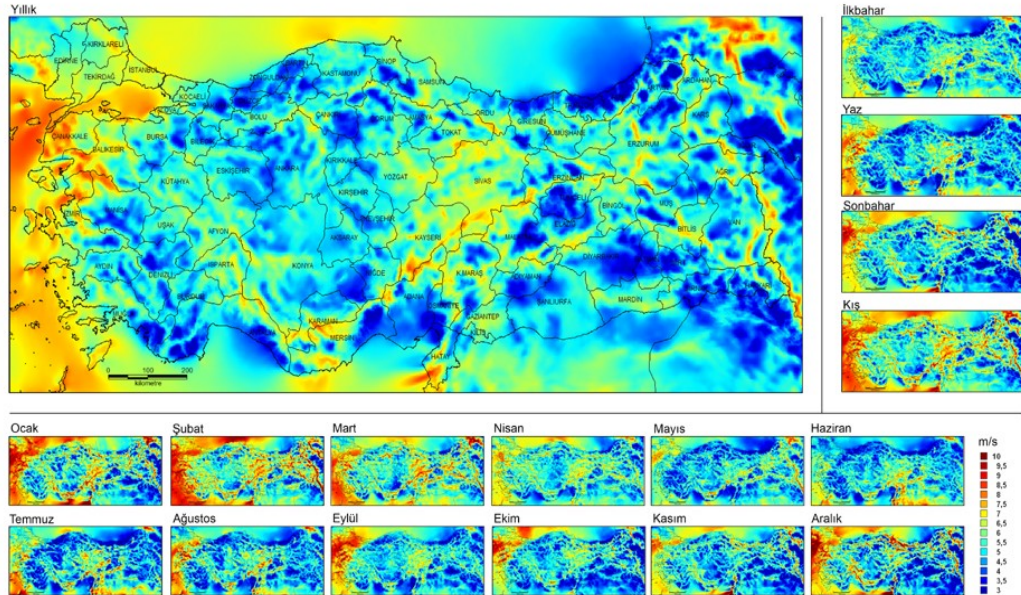
TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ATLASI
Rüzgar Güç Yoğunluğu Haritası
50 m Yükseklik



Bu haritalar 200m çözünürlükte rüzgar verileri ile oluşturulmuştur.

Şekil 2.3. Türkiye rüzgar güç yoğunluğu haritası (h=50 m için)[7]

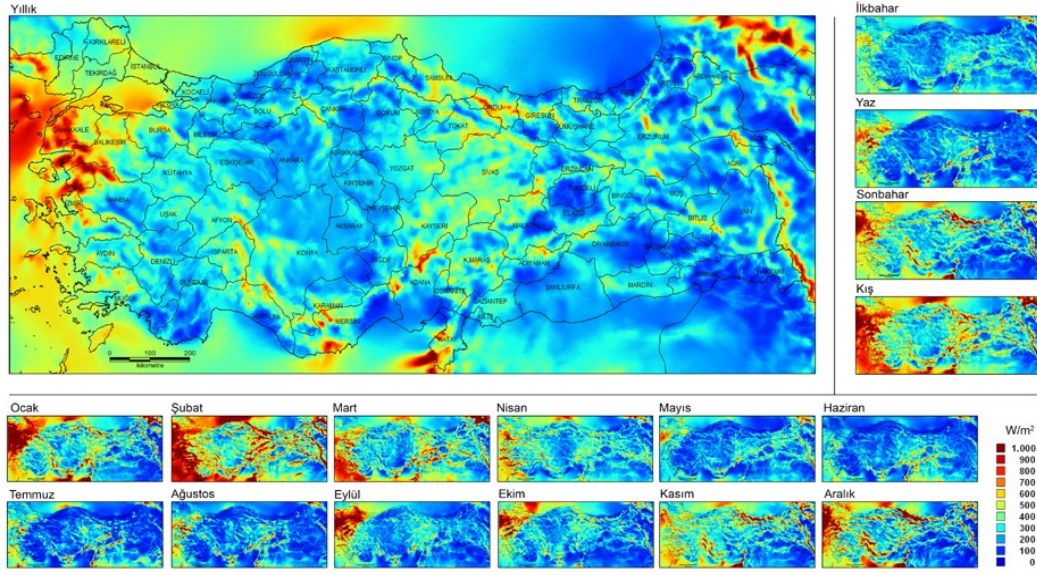
TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ATLASI
Rüzgar Hızı Haritası
50 m Yükseklik



Bu haritalar 200m çözünürlükte rüzgar verileri ile oluşturulmuştur.

Şekil 2.4. Türkiye rüzgar hızı haritası (h=50 m için)[7]

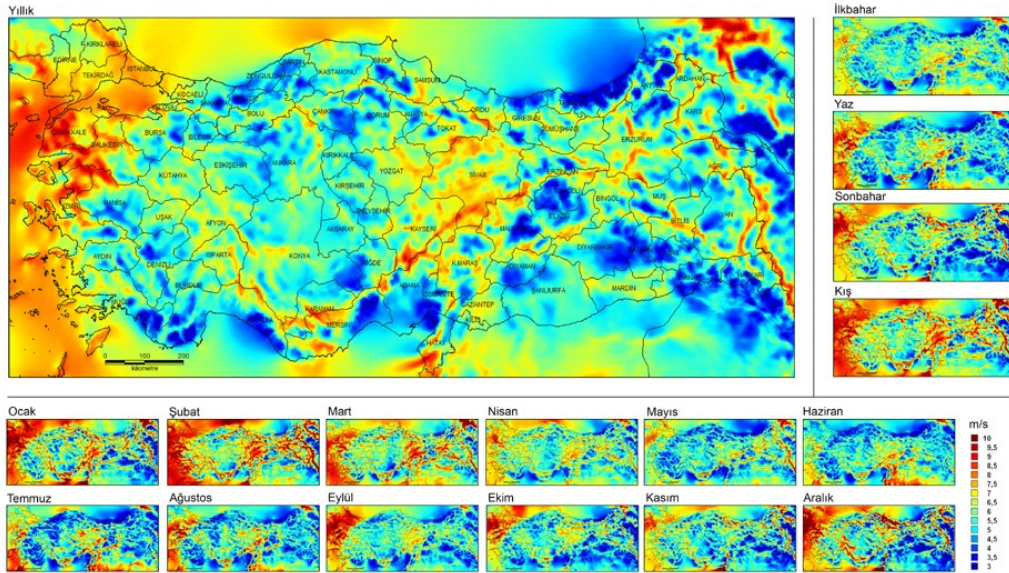
TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ATLASI
Rüzgar Güç Yoğunluğu Haritası
100 m Yükseklik



Bu haritalar 200m çözünürlükte rüzgar verileri ile oluşturulmuştur.

Şekil 2.5. Türkiye rüzgar güç yoğunluğu haritası (h=100 m için)[7]

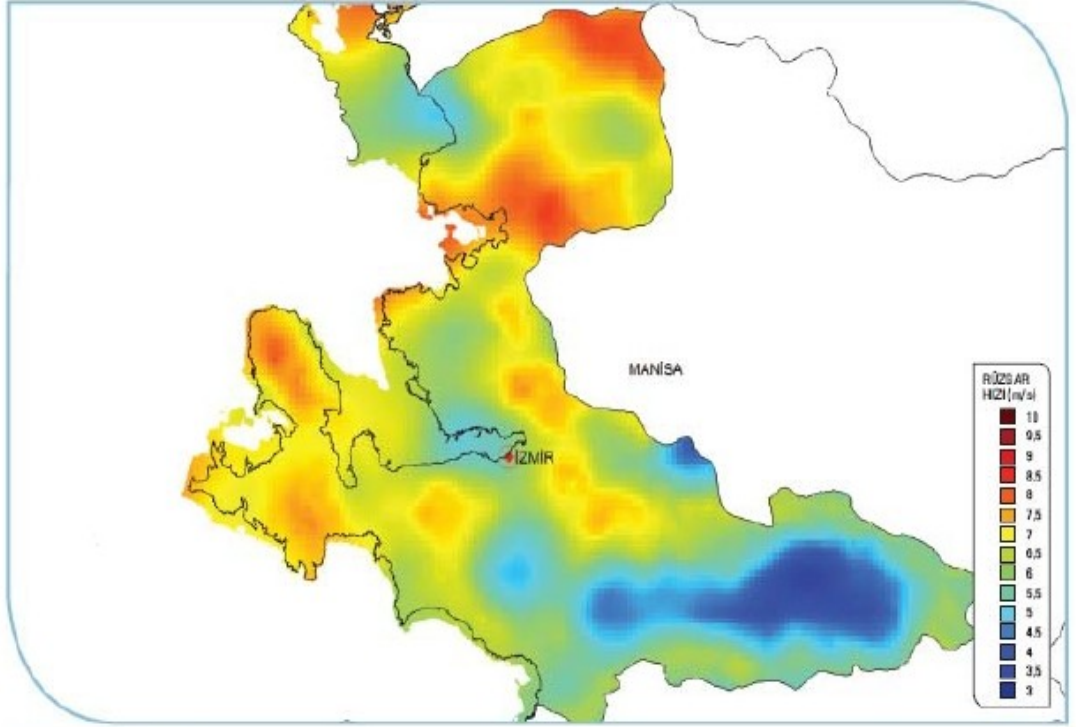
TÜRKİYE RÜZGAR ENERJİSİ POTANSİYEL ATLASI
Rüzgar Hızı Haritası
100 m Yükseklik



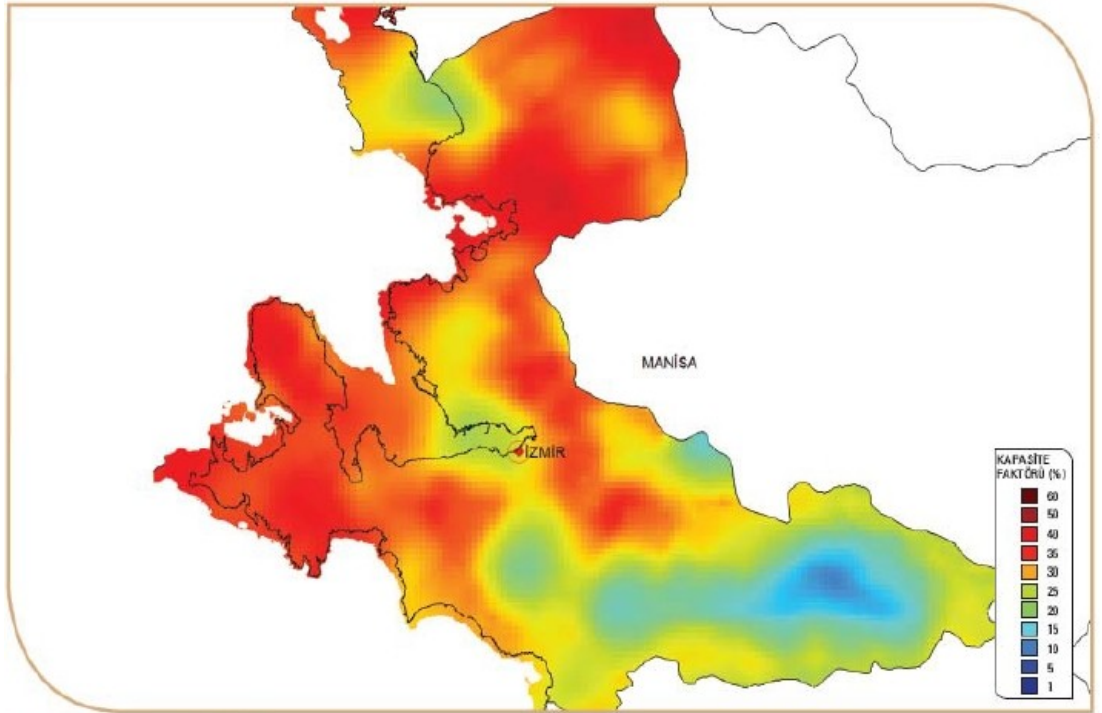
Bu haritalar 200m çözünürlükte rüzgar verileri ile oluşturulmuştur.

Şekil 2.6. Türkiye rüzgar hızı haritası (h=100 m için)[7]

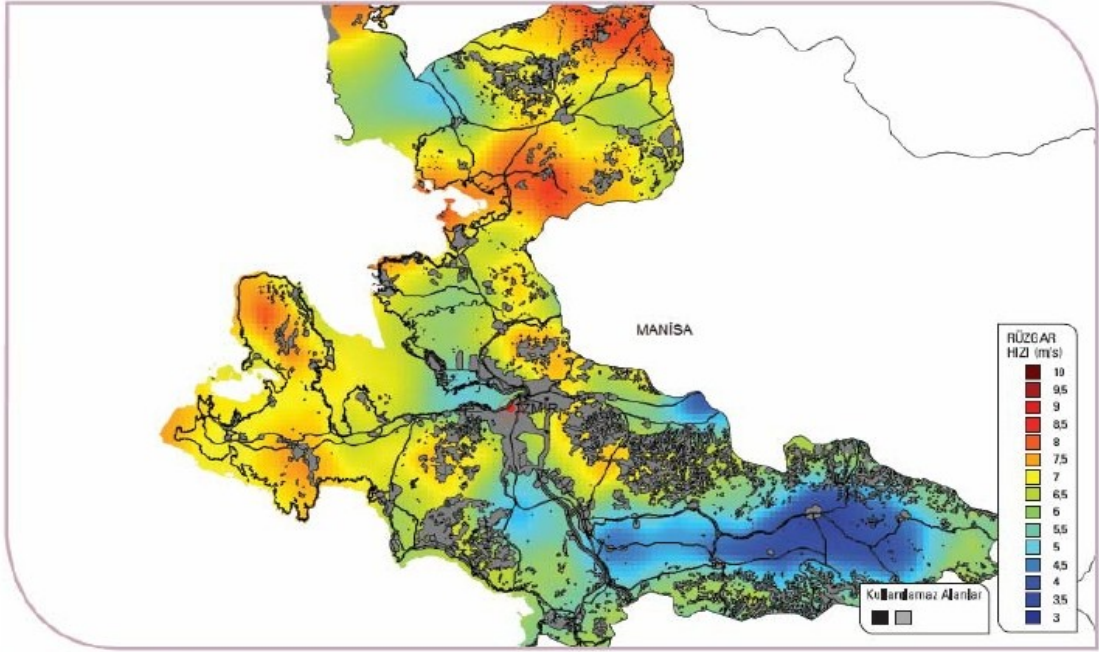
Şekil 2.7. ve Şekil 2.8.'de 50 m yükseklikte İzmir Rüzgar Hızı (m/s) Haritası ve Kapasite Faktörü Dağılımı görülmektedir[8].



Şekil 2.7. İzmir rüzgar hızı haritası (h=50 m için)[8]



Şekil 2.8. İzmir kapasite faktörü dağılımı (h=50 m için)[8]



Şekil 2.9. İzmir rüzgar enerjisi santrali kurulabilir alanlar[8]

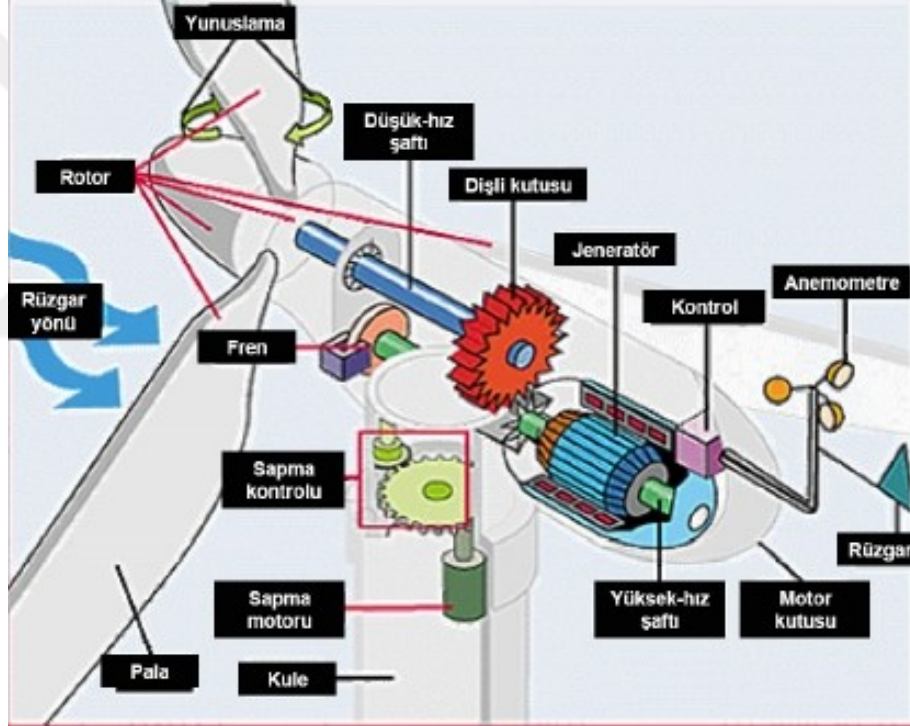
Ekonomik bir Rüzgar Enerjisi Santrali için en uygun yatırımın 7 m/s veya üzeri rüzgar hızı ve kapasite faktöründe $\geq 35\%$ olması gerekmektedir[8]. Şekil 2.9.'da İzmir'de Rüzgar Enerjisi Santrali için en uygun bölgeler görülmektedir[8]. Buna göre kırmızı bölgeler santral için en uygun, gri bölgeler ise uygun olmayan bölgeleri göstermektedir. Tablo 2.1.'de İzmir'de kurulabilir Rüzgar Enerjisi Tesisi Güç Kapasitesi toplamı görülmektedir[8].

Tablo 2.1. İzmir'de kurulabilir rüzgar enerjisi tesisi güç kapasitesi[8]

50 m'de Rüzgar Gücü (W/m ²)	50 m'de Rüzgar Hızı (m/s)	Toplam Alan (km ²)	Toplam Kurulu Güç (MW)
300 – 400	6.8 – 7.5	933,09	4.665,44
400 – 500	7.5 – 8.1	868,30	4.341,52
500 – 600	8.1 – 8.6	317,68	1.588,40
600 – 800	8.6 – 9.5	251,78	1.258,88
> 800	> 9.5	0,02	0,08
	Toplam	2.370,86	11.854,32

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Rüzgar türbinleri, rüzgarda bulunan kinetik enerjiyi, önce mekanik enerjiye daha sonra elektrik enerjisine dönüştüren makinelerdir. Genel olarak bir rüzgar türbini; kule, jeneratör, dişli kutusu gibi hız dönüştürücüler, elektrik – elektronik ekipmanlar ve kanatlardan meydana gelir. Şekil 3.1’de rüzgar türbinlerinin elemanları görülmektedir[17]. Rüzgarın sahip olduğu kinetik enerji önce rotorda mekanik enerjiye çevrilir. Daha sonra rotor milinin devir hareketi dişli kutusu ile hızlandırılarak gövde üzerinde bulunan jeneratöre aktarılır. Türbinden elde edilen elektrik enerjisi ya aküler yardımı ile depolanır veya doğrudan alıcılara elektrik hatları ile ulaştırılır.



Şekil 3.1. Rüzgar türbinlerinin elemanları[17]

3.1. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Rüzgar türbinleri tarih boyunca çeşitli evrimler geçirmişlerdir ve günümüzde kullanılan türbinler farklı tiplerdedir. Günümüze kadar değişik şekillerde ve tiplerde geliştiren rüzgar türbinlerinden bazıları şimdilerde ticari olarak kullanılmaktadır. Kullanımdaki rüzgar türbinlerinin boyut ve şekil olarak çeşitli tipleri vardır.

Türbinler, dönme eksenine, güç kontrol sistemlerine, rotorun dönüş hızına ve kullanım yerine göre sınıflandırılabilirler. Rüzgar türbinleri dönme eksenine göre iki gruba ayrılır:

- Yatay eksenli rüzgar türbinleri
- Dikey eksenli rüzgar türbinleri

3.2. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde; türbin dönme eksenini rüzgar yönüne paralel, türbin kanatları ise rüzgar yönüne dik konumdadır. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde, rotor kanatlarının sayısı azaldıkça rotor daha hızlı dönmektedir. Yatay eksenli rüzgar türbinlerinin verimleri yaklaşık olarak % 45'dir. Yatay eksenli rüzgar türbinleri, genel olarak yerden 20 – 30 m yükseklikte ve çevrede bulunan engellerden 10 m daha yüksek olacak şekilde yerleştirilmektedir. Rüzgar hızının, rotor kanadı ucu hızı oranına Kanat Uç Hız Oranı (λ) denir. Eğer;

- Kanat Uç Hız Oranı = 1 – 5 ise çok kanatlı rotor,
- Kanat Uç Hız Oranı = 6 – 8 ise üç kanatlı rotor,
- Kanat Uç Hız Oranı = 9 – 15 ise iki kanatlı rotor,
- Kanat Uç Hız Oranı > 15 ise tek kanatlı rotor kullanılır.

Yatay eksenli rüzgar türbinleri ayrıca, farklı sayıda rotor kanadına sahip olan ve rüzgarı karşıdan alan veya rüzgarı geriden alan türbinler olarak sınıflandırılır.

3.2.1. Rüzgarı Karşıdan Alan Türbinler

Günümüze kadar yaygın olarak kullanılan bu türbinlerde, rotorlar rüzgara dönüktür. Bu türbinlerin en önemli üstünlükleri, kulenin arkasında kalan rüzgar gölgeleme etkisini çok az hissetmeleridir, yani rüzgar kuleye eğilerek ulaşır. Türbin kulesi yuvarlak veya düz olsa bile kanatların kuleden her geçişinde türbinin ürettiği güç biraz azalmaktadır. Bundan dolayı rüzgar çekilmesi nedeni ile kanatların sert malzemelerden yapılması gerekir ve türbin kanatlarının kuleden çok az uzak mesafede yerleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca, rüzgarı karşıdan alan türbinler, rotorunu rüzgara karşı döndürmek için “Yaw” mekanizmasına ihtiyaç duyarlar.

3.2.2. Rüzgarı Geriden Alan Türbinler

Rüzgarı geriden alan türbinlerin rotorları kule arkasına konulmaktadır. Rüzgarı geriden alan türbinlerin en önemli üstünlükleri, rüzgar yönüne dönmek için “Yaw” mekanizmasına ihtiyaç duymazlar. Eğer türbin gövdesi ve rotor tasarımları uygun yapılırsa, türbin gövdesi rüzgar yönünü pasif şekilde izler. Bu türbinlerin diğer bir üstünlükleri kanatlarının esnek olmasıdır. Böylece, hem ağırlık hem de türbinin güç dinamiği açısından önemli bir yarar sağlanır. Bu türbinlerin avantajı; rüzgarı karşıdan alan türbinlere göre daha hafif yapılmaları nedeni ile kule yükünün azalmasıdır. Ancak, bu türbinlerde kanat kuleden geçerken meydana gelen güç dalgalanması, türbine rüzgarı karşıdan alan türbinlerden daha çok zarar verir.

3.3. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin dönme eksenleri rüzgar yönüne dik ve düşey yöndedir. Ayrıca bu türbinlerin kanatları da düşey yöndedir. Dikey eksenli rüzgar türbinleri, rüzgarı her yönden alabilme üstünlüğüne sahiptir. Dikey eksenli rüzgar türbinleri rüzgarı sürükler veya kaldırır. Fakat ilk harekete geçişleri güvenilir değildir. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin verimleri yaklaşık olarak %35'tir. Dikey eksenli rüzgar türbinlerinin jeneratör ve dişli kutuları zemine konulabildiğinden kuleye ihtiyaç duymazlar. Bundan dolayı düşük rüzgar hızlarında çalışmak durumundadırlar ve “Yaw” mekanizmasına gerek yoktur. Bu türbinler özellikle düşük rüzgar hızları ve az miktarlarda su pompalamak için yapılmışlardır. Kanat sayısının artması kullanılan malzeme miktarının artmasına neden olduğundan, yüksek rüzgar hızlarında düşük verimde çalışırlar. Bu türbinleri zemine bağlamak için çelik halatlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Dikey Eksenli Rüzgar Türbinlerinin faydaları;

- Jeneratör ve dişli kutusu gibi ekipmanlar zemine yerleştirildiği için, türbini kule üzerine yerleştirmeye gerek kalmaz. Kule maliyeti olmaz.

- Türbinleri rüzgar yönüne çevirmeye ihtiyaç yoktur. Bundan dolayı dümen mekanizmasına gerek yoktur.
- Türbinin mili hariç diğer ekipmanların bakım ve onarımları kolaydır.
- Elde edilen güç zemin seviyesinde olduğundan, iletilmesi daha kolaydır.

Dikey Eksenli Rüzgar Türbinlerinin kötü yönleri;

- Zemine yakın oldukları için alt bölgedeki rüzgar hızları düşüktür.
- Verimleri Yatay Eksenli Rüzgar Türbinlerine göre düşüktür.
- Dönmeye başlamaları için bir motor tarafından ilk hareketin verilmesine ihtiyaç duyarlar.
- Devrilmeden sabit durabilmesi için halatlar ile zemine sabitlenmesi gerekir.
- Türbin mili yataklarının değiştirilmesi gerektiğinde, türbinin tamamının zemine yatırılması gerekir.

3.4. Rüzgar Türbinlerinin Malzemesi, Ömrü, Bakımı ve Güvenliği

Bir kompozit yapı olan kanatların üretiminde genel olarak polimer yapıda malzemeler kullanılır. Bunların içinde de epoksi malzemeler özellikle hacimsel çekme dayanımlarının ve boyutsal denge değerlerinin diğer malzemelere oranla daha yüksek olması nedeni ile tercih edilirler. Takviye malzemesi olarak genelde çok yönlü bir şekilde cam veya karbon liflerinden oluşan ipliklerin dokunması ile elde edilen kumaşlardan yararlanır. Bunlar dışında dolgu malzemeleri, köpükler, ağaç malzemeler, bal peteği görünümlü malzemeler kullanılmaktadır. Rüzgar türbini kanatlarından; uzun süre dayanıklılığını korumaları, aerodinamik olarak türbinin enerji verimliliğine ek katkı sağlamaları, tüm dış etkenlere karşı bütünlüğünü ve yüzey kalitelerini kaybetmemeleri beklenmektedir. Bu özellikleri sağlamak için yapılan tüm çalışmalar ve denemeler sonucu rüzgar türbinleri kanatlarının kompozit malzeme teknolojisi ile üretilmesi en uygun yöntem olmaktadır. Kullanılan malzemelerin de günden güne gelişmesi ile bunu desteklemektedir.

Günümüzde 30 yıldan daha fazla çalışan türbin bulunduğu için kesin bir ömür verilememekle birlikte, beklenen türbin ömrünün yaklaşık 35 yıl olabileceği

düşünülmektedir. Dünyada bugün için yaklaşık otuz binden fazla türbin çalışmaktadır. Türbinlerdeki 35 yıllık tasarım ömrü sahip oldukları jeneratörler tarafından belirlenmektedir. Ancak türbinlerin gerçek ömürleri hem türbin kapasitesine hem de yerel iklim şartlarına bağlıdır.

Günümüzde rüzgar türbinleri 20 yıllık ömürlerinde yüz yirmi bin saat çalışacak şekilde tasarlanırlar. Bu süre, bir otomobillerin altı bin saat çalışma ömürlerinden çok daha fazladır. Danimarka'da 1975'ten bu yana kullanılan beş bin adet türbin üzerinde yapılan incelemelerde, yeni üretilen türbinlerin bakım ve onarım maliyetlerinin eski üretilen türbinlerin bakım ve onarım maliyetlerinden çok daha düşük olduğu görülmüştür. Eski üretim türbinlerin yıllık bakım maliyetleri, türbin yatırım maliyetlerinin yaklaşık %3'ü dolayında olmaktadır. Yeni üretim türbinlerde ise bu oran, yaklaşık yatırım maliyetlerinin %1.5–2 mertebesinde dir. Tek bir türbin bakım maliyeti, bir rüzgar türbini sahasındaki türbinlerin bakım maliyetinden çok daha fazladır. Bazı rüzgar türbini parçalarının bozulması ve değiştirilmesi, diğerlerinden çok daha olasıdır. Bu, özellikle rotor kanatları ve dişli kutusunda görülür. Özellikle kanatlar, dişli kutusu ve jeneratör, türbin maliyetinin %15–20 arasında değişen bölümünü oluşturur.

Günümüzde büyük rüzgar türbinlerinde konik çelik boru şeklinde kuleler kullanılmaktadır. Bu kulelerin kafes kulelere göre en büyük üstünlükleri, daha güvenli olmaları ve rüzgar türbininin bakım ve onarımının personel tarafından daha rahat ve güvenli yapılmasını sağlamalarıdır. Dezavantajı ise maliyetlerinin yüksek olmasıdır. Kafes tipi kulelerin en büyük dezavantajları, rüzgar üretim sahasına daha az uygun olmaları, bakım onarım ve servis için güvenlik açısından bazı tehlikeler içermeleridir. Fakat yeni üretilen rüzgar türbinlerinde bakım ve işletme personelinin düşmemesi için inerken ve çıkarken her türlü güvenlik önlemi alınmıştır. Türbin parçalarının bozulması durumunda veya ortak şebekeden ayrılma durumunda rotorun ve türbinin durması gerekmektedir. Eğer bu durma olmazsa, rotor çok kısa sürede hızlanmaya başlayacaktır. İşte bu gibi durumlarda türbin üzerinde aşırı hızlanma koruması olmalıdır. Yeni imal edilen türbinlerde bu önlemler yer almaktadır.

3.5. Bir Rüzgâr Türbininde Güç ve Kontrol Sistemleri

Rüzgar türbinleri, nominal gücü vermek üzere tasarlandıkları nominal hızların üzerinde, türbinin zarar görmesini önlemek amacı ile kontrol sistemlerine sahiptirler. Bu sistemler, türbin nominal hızı aştıktan sonra kanatların aerodinamik performansını düşürerek jeneratörde oluşabilecek aşırı yüklemeyi önlerler. Türbin güç eğrisini ideal eğriye yaklaştırmak için kullanılan beş farklı kontrol yönteminden söz edilebilir;

- Yön Açısı (Yaw) Kontrolü
- Pasif Kanat Açısı (Pitch) Kontrolü
- Pasif Durma (Stall) Kontrolü
- Aktif Kanat Açısı (Pitch) Kontrolü
- Aktif Durma (Stall) Kontrolü

Bu beş yöntemden ilk ikisi geniş uygulama alanı bulamazken, son üç sistem yaygınlık kazanıdılar. Önce ilk iki tasarımdan kısaca söz edilecektir.

Yön Açısı kontrollü türbinler; türbinlerin çoğunda, türbini rüzgar yönüne çevirmek için mevcut bulunan Yön Açısı kontrolü sistemini güç kontrolü için kullanma düşüncesine dayanır. Bu sistemler; rüzgar tasarım hızının üzerine çıktığında, türbini rüzgar akımının doğrultusundan farklı yöne çevirmek ve böylece türbinin güç katsayısını düşürmek düşüncesine dayanırlar. Fakat bu sistem yeterli Yön Açısı değiştirme hızlarına ulaşmanın içerdiği zorluklar ve kanat ile türbin gövdesinin dönüş sırasında meydana getirdiği momentlerden dolayı yaygın olarak kullanılan bir sistem değildir. Bu tür sistemler, yön değiştirme özellikle ilk 10° yakınında önemli bir güç katsayısı düşüşü sağlayamazlar, bundan dolayı bu değer üzerine çıkmak için geçen zamanda kanatlara aşırı yükleme ihtimali artmaktadır. Ancak bu dezavantajlarına rağmen, bu tasarım İtalya'da 60 m çaplı $8^\circ/\text{sn}$ 'lik yüksek dönme hızına sahip bir türbinde kullanılmıştır.

Pasif Kanat Açısı kontrolünde ise temel düşünce, kanatları yüksek hızlarda burularak istenen kanat açısına ulaşacak şekilde tasarlamak, bu şekilde yüksek

hızlarda gücü sınırlayarak güç kontrolünü sağlamaktır. Düşünce mantıklı ve basit gözükse de uygulamada bunu başarmak zordur. Çünkü güç kontrolü için gerekli burulma ile kanat üzerine gelen yüklerin oluşturduğu burulma birbiriyle uyumlu olmayabilir. Bu iki sistemden bahsettikten sonra yaygın olarak kullanılan diğer üç sistem daha geniş olarak incelenebilir.

3.5.1. Durma Kontrollü Türbinler

Durma kontrollü türbinler, rotora sabit bir açı ile sabitlenmiş kanatlara sahip sistemlerdir. Bu türbinlerde, rüzgar hızındaki artış ile birlikte hücum açısının da artması ve kanatın durma etkisine girmeye başlaması ile güç kontrolü sağlanır. Bu türbinlerdeki kanat geometrisi, rüzgar nominal hızın üzerindeki hızlara çıktıkça, performansı düşürecek şekilde tasarlanmıştır. Kanat kök bölgesinden başlayarak durma etkisine girer, bu şekilde tasarım hızı üzerindeki hızlarda, aşırı yükleme nedeni ile türbin sistemlerinde oluşacak hasarlar önlenmiş olur. Durma kontrollü türbinler nominal hızın üzerindeki hızlarda, kanat açısı kontrollü türbinler gibi sabit bir güç seviyesini koruyamazlar, bu nedenle nominal hız üzerinde enerji üretimi kanat açısı kontrollü türbinlerden düşüktür. Durma kontrollü türbinlerin temel avantajı, karmaşık bir kontrol sistemine ihtiyaç duymamaları ve rotorda hareketli parçalara sahip olmamalarıdır. Durma kontrollü türbinler sadece türbinlerin çalıştırılması ve durdurulması sırasında kontrole ihtiyaç duyarlar.

3.5.2. Kanat Açısı Kontrollü Türbinler

Kanat açısı kontrollü türbinlerde kanatlar; durma kontrollü türbinlerin tersine, rotora sabit bir açı ile sabitlenmiş değildirler. Kanatlar, kanat açısı kontrol mekanizması ile rüzgar hızına göre kendi eksenini etrafında dönebilmektedir. Kanat açısı kontrollü türbinler, nominal hız üzerindeki hızlarda sabit güç üretimi sayesinde daha kaliteli bir güç çıkışı sağlarlar. Fakat durma etkisine göre tasarlanmadıkları için ani artan rüzgar hızlarına karşı hassas davranırlar.

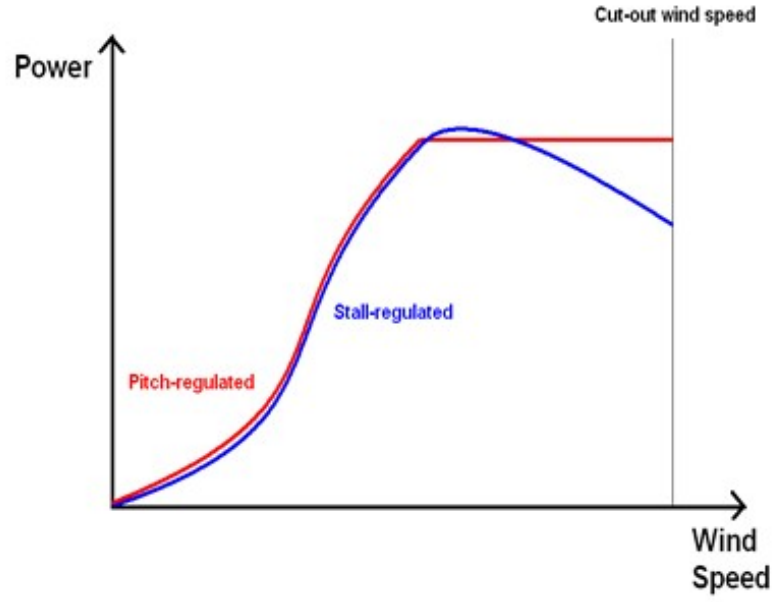
Türbinlerde kanat açısı kontrol mekanizmasının kullanımı farklılıklar gösterebilir. Kanat açısı kontrol sistemleri, türbinlerde bütün rüzgar hızlarında

kullanılarak elde edilen enerjinin artırılması sağlanabilir veya türbinlerde aşınmayı azaltmak için sadece nominal rüzgar hızlarının üzerinde güç kontrolü için kullanılabilir. Kanat açısı kontrollü sistemler yüksek güçlü türbinlerde daha yaygın olarak kullanılmakla birlikte, orta güçlü türbinlerde de kullanılmaktadır. Kanat açısı kontrollü türbinlerden elde edilecek performans artışı temel olarak kullanılan kanat açısı mekanizmalarının hızına ve hassasiyetine bağlıdır. Bu türbinler sahip oldukları kanat açısı sistemleri nedeni ile yüksek hızlarda yapısal sorunlar yaşamaya, sabit kanata sahip durma kontrollü türbinlere oranla daha eğilimlidirler.

3.5.3. Aktif Durma Kontrollü Türbinler

Aktif durma kontrolü, bundan önce söz edilen iki kontrol sistemine göre daha yeni bir tasarıma sahiptir. Aktif durma kontrolü sisteminde, kanat açısı kontrollü türbine benzer şekilde, güç kontrolü için kanat eksenini etrafında döndürülerek nominal rüzgar hızları üzerinde sabit güç üretimi sağlanır. Fakat aktif durma kontrollü sistemlerde dönüş yönü, kanat açısı kontrollü sistemlerin tersi yönündedir. Kanat açısı kontrollü türbin, nominal rüzgar hızlarının üzerine çıktığında kanat hücum açısını düşürecek şekilde döndürürken, aktif durma kontrollü bir türbin kanatları ters yönde döndürüp, türbini durma etkisine sokar.

Aktif durma kontrollü türbinlerin güç eğrisi, kanat açısı kontrollü türbinlere benzer, bu tasarımda güç kontrolü için gerekli kanat döndürme açıları, aktif kanat açısı kontrolüne göre oldukça düşüktür. Böylece türbin rüzgar hızındaki değişimlere daha hızlı yanıt verebilir. Ayrıca türbin nominal rüzgar hızlarının üzerinde durma etkisine gireceğinden, ani rüzgar hızlarına karşı tepkisi daha düşük olacaktır.



Şekil 3.2. Kanat açısı ve durma kontrollü türbinlerin güç eğrisi

3.6. Rotor Hızına Göre Türbinlerin Sınıflandırılması

Türbinler, rotorun dönüş hızına göre; sabit ve değişken hızlı olmak üzere iki sınıfa ayrılırlar.

3.6.1. Sabit Rotor Dönüş Hızlı Türbinler

Sabit rotor dönüş hızlı türbinler, nominal rüzgar hızlarında, nominal güce ulaşmalarını sağlayacak sabit bir dönüş hızında dönen türbinlerdir. Bu sistemler, birçok rüzgar türbininde kullanılmıştır. Tasarım kolaylığı sağlamış olmakla birlikte sadece tek hızda döndükleri ve buna bağlı olarak sadece belirli bir rüzgar hızında ve yakınında en verimli şekilde çalışmak üzere tasarlandıkları için, bu nominal hızdan uzaklaştıkça verimleri düşer. Bu sorunu çözmek için kullanılan ve tasarımda çok büyük değişiklikler gerektirmeyen diğer bir sistem ise iki dönüş hızlı türbinlerdir. İki dönüş hızlı türbinlerin, sabit hızlı veya değişken hızlı olarak sınıflandırılması konusunda bazı görüş ayrılıkları vardır. Bu yüzden tam olarak değişken hızlı sayılmazlar. Bu türbinler iki farklı dönüş hızında çalışabilirler. Eskiden tasarlanan iki dönüş hızlı türbinler, iki farklı jeneratör kullanırken artık tek jeneratör kullanan ve bu

jeneratörün kutup sayısı değiştirerek, jeneratörün senkron hızını ayarlanabilirler. İki dönüş hızlı tasarım, düşük hızlarda bile tasarım uç hız oranına yakın uç hızlar sağlayarak verimi yükseltebilir. Fakat bu sistemler jeneratörler veya jeneratör kutupları arasındaki geçiş sırasında oluşabilecek akım yükselmesi gibi sorunlara karşı önlemler almayı gerektirir. İki dönüş hızlı türbinler, dünya genelinde en yaygın kullanılan türbin sistemleridir, çünkü sabit dönüş hızlı türbinler gibi basit mekanizmalara sahiptirler ve bu sistemlere oranla enerji üretiminde artış sağlarlar.

3.6.2. Değişken Rotor Dönüş Hızlı Türbinler

Değişken rotor dönüş hızlı rüzgar türbinleri, geniş bir rüzgar hızı aralığında en iyi uç hız oranında çalışırlar. Böylece rotor verimliliğini yükseltip daha fazla enerji elde edilmesini sağlarlar. Bu türbinler genel olarak birlikte kullanıldıkları kanat açısı sistemi ile birlikte nominal hızdan çok düşük rüzgar hızlarında bile yüksek verimlilikle çalışabilirler. Ayrıca değişken rotor dönüş hızlı türbinler, düşük rüzgar hızlarında, düşük devirlerde çalıştıkları için gürültü konusunda iyidirler. Değişken dönüş hızlı tasarım, dişli kutusuna gelen yükün düşmesini sağlamakla birlikte bu türbinlerde, sabit dönüş hızlılarda kullanılanlardan farklı tiplerde jeneratörlerin kullanılması gerekir. Değişken dönüş hızlı tasarımın sağladığı yararlar rağmen çok yaygın olarak kullanılamamasının temel nedeni güç kontrol sistemlerinin maliyetinin yüksek olmasıdır. Bu neden ile bu tür sistemlerin büyük güçlü türbinlerde kullanılması maliyet açısından daha uygun görülmektedir. Değişken dönüş hızlı tasarım 600 kW sınıfında da kullanım alanı bulmaya başlamıştır. De-Wind firmasının ürettiği D4 – 46 ve D4 – 48 modelleri bu sistemi kullanan türbinlere örnek olarak gösterilebilir.

Çeşitli türbin kontrol sistemleri arasındaki seçimde temel düşünce, kontrol sisteminin sağlayacağı yararın kendi maliyetini karşılayıp karşılamayacağıdır. Türbinde kullanılacak daha gelişmiş bir sistem maliyetteki artışı karşılayacak bir enerji üretimi artışı sağlayacak ise bu türbinde kullanılabilir. Bu neden ile aktif kanat açısı kontrollü, aktif durma kontrollü ve değişken dönüş hızlı gibi gelişmiş türbin tasarımlarının kullanımı, türbin boyutundaki artış ile birlikte tüm dünyada artmaktadır.

4. RÜZGAR TÜRBİNİ KANADINA ETKİYEN KUVVETLER

4.1. Rüzgar Türbininde Güç

Rüzgar enerjisi;

- Kanatların taradığı alana,
- Rüzgar hızının küpüne
- ve havanın yoğunluğuna bağlıdır. Türbinden alınacak enerji ise, kanatların verimine bağlıdır. Bu da kanat profili ve rotor devrine bağlıdır.

Rüzgarın taşıdığı güç şu formülle hesaplanır;

$$P = \frac{1}{2} Q V^2 \quad (4.1) \text{Kütlesel debi;}$$

$Q = \rho A V$ (4.2) Kütlesel debi denklemini güç formülüne uyarlırsak, güç;

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4.3)$$

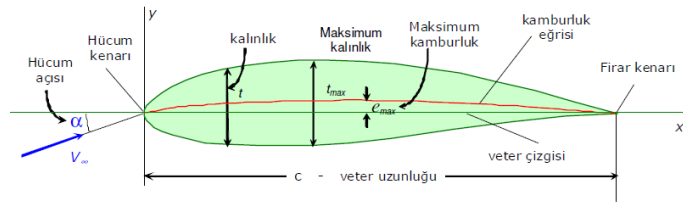
olarak yazılabilir. Burada, $P(W)$ = güç, $A(m^2)$ = kanatların taradığı alan, $V(m/s)$ = rüzgâr hızı ve $\rho(kg/m^3)$ = havanın yoğunluğudur.

4.2. Türbin Kanadının Tasarımı

Türbin imalatı öncesinde yapılan araştırmalar sonucunda, kanat tasarımının rüzgar türbinlerinde çok önemli bir faktör oluşturduğu gözlemlenmiştir. Kanat profilindeki en ufak bir pürüz veya değişikliğin kanat verimini ciddi şekilde değiştirdiği bilinmektedir. Aerodinamik açıdan bir rüzgar türbini kanadının maksimum verimi 4 derecelik rüzgar hücum açısıyla oluşmaktadır. Bu açıyı kanadın her kesitinde yakalayabilmek için, kanada rotor eksenine göre değişik kesitlerde değişik açılar verilmesi gerekir. Bunun sebebi kanadın uç kısmına yaklaşıldıkça, kanadın dönme hızından kaynaklanan baş rüzgarının, gerçek rüzgar hızını geçerek, bileşke rüzgar vektörünün açısını değiştirmesidir. Hava araçlarının tasarımında kanat profillerindeki en önemli iki olgu; kaldırma katsayısı – CL (Lift Coefficient) ve sürüklenme katsayısı – CD (Drag Coefficient) değerleridir. Kaldırma katsayısı kanadın, bağlandığı hava aracını ne kadar kuvvetle kaldıracağını gösteren bir

katsayıdır. Sürüklenme katsayısı ise kanadın rüzgarın çarptığı ekseninde ne kadar kuvvetle geriye doğru çekeceğini gösteren değerdir. Belirlenen rüzgar çarpma açısında (Hücum Açısı, α), CL/CD değeri ne kadar büyük olursa kanat o kadar verimli olur. Rüzgar türbinlerinde de aynı teori geçerlidir. CL değeri kanadı dönme yönünde hızlandırırken, CD değeri ise kanadı ters yönde yavaşlatmaktadır. Genellikle sesaltı uçuş hızlarında kullanılan kanat profillerinin ya dairesel yada özel olarak geliştirilmiş eliptik profilde bir hücum kenarı vardır. Genellikle bu kanat profillerinde kalınlık 37 çeyrek kiriş ile yarım kiriş arasında yer alan bir noktaya kadar düzgün bir şekilde artar. Profil kesiti bu noktadan sonra kaçış kenarına doğru sivri bir şekil alır. Genellikle bu kanat profillerinde kaçış kenarı sivri veya imalat zorluğu nedeniyle bazı profillerde hafifçe küt şekilde olabilir.

Kanat profili geometrisi



Kalınlık oranı	$\delta = \frac{t_{\max}}{c}$	$\delta < \%10$ $\delta \sim \%10-14$ $\delta > \%14$	ince profil (yüksek hızlarda) orta kalınlıkta profil kalın profil (düşük hızlarda)
Kamburluk oranı	$\gamma = \frac{e_{\max}}{c}$	$\gamma < \% 4-5$ $\gamma > \% 4-5$	küçük kamburluk (uçaklarda) büyük kamburluk (kompresör-türbin pallerinde)

Şekil 4.1. Kanat profili geometrisi[18]

4.2.1. Kalınlık Oranı

Uçakların uçuş hızlarına göre sivil uçaklarda, %8 – 9 ile %18 – 20 arasındaki değişik kalınlık oranlarına sahip kanat profillerine bulunmaktadır. Sesüstü hızlarda uçan uçaklarda ise profil kalınlık oranının %3'e kadar indirilmektedir.

profil kalınlık oranı $(d) < \%10$ ince profil

profil kalınlık oranı $(d) \sim \%10 - 14$ orta kalınlıkta profil

profil kalınlık oranı $(d) > \%14$ kalın profil

4.2.2. En Büyük Kalınlık Noktası Konumu

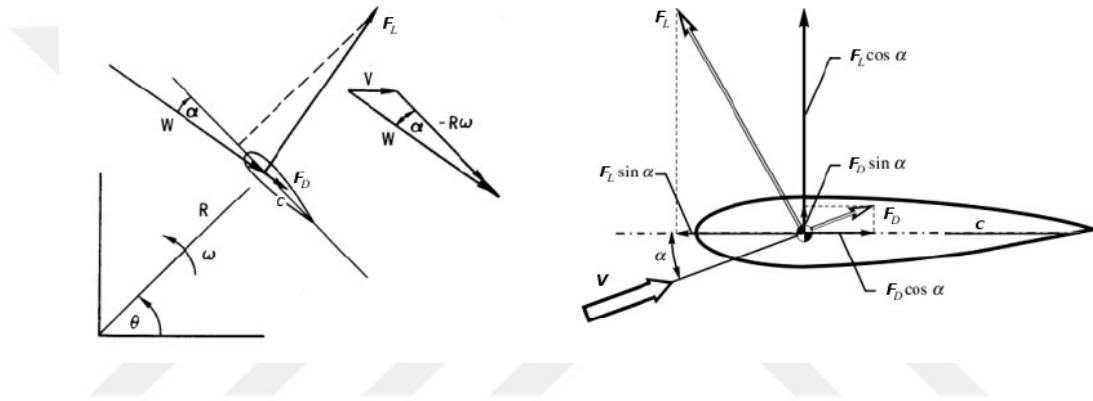
Kanat profilin aerodinamik performansını, en büyük kalınlık noktasının kiriş boyunca bulunduğu yer önemli ölçüde etkiler. Genellikle en büyük kalınlık noktası kiriş boyunun yaklaşık %30'u ile %60'ı arasında bulunur. Daha önceden üretilen bazı kanat profillerinde bu noktanın yeri kiriş boyunun %25'inde olduğunu görülmektedir. Bazı özel kanat profillerinde ise en büyük kalınlık noktası kiriş boyunun %60'ından daha geride bulunabilir. Kanat profilleri simetrik veya kambur şekilli olabilir. Simetrik profiller uçak kanatlarında pek kullanılmaz. Genellikle bu kanat profilleri, çift kanatlı uçakların kanatlar arasındaki bağlantı elemanlarında, düşey ve yatay kuyruk yüzeylerinde, iniş takımı gibi uçak üzerinde fazladan direnç meydana getiren elemanların üzerinde ve bunun gibi yerlerde kullanılırlar.

4.2.3. Kamburluk Oranı

Günümüzde uçak kanatlarında yaklaşık %0 – 5 arasında kamburluk oranı bulunmaktadır. Buna karşın türbin ve kompresörlerde ise daha büyük kamburluk oranı olan kanat profilleri bulunmaktadır. Genellikle kaynaklarda kanat profillerinin koordinatları; kirişe ve hücum kenarına bağlı bir eksen takımında, kiriş boyu ile bölünmüş olarak veya kirişin yüzdesi olarak verilmektedir. Günümüzde çeşitli ülkelerde geliştirilmiş yüzlerce kanat profili bulunmaktadır. Bu kanat profillerin büyük bir bölümü İkinci Dünya savaşı öncesi ve savaş yıllarında Amerika'da NACA (National Advisory Committee for Aeronautics – Ulusal Havacılık Danışma Kurulu) tarafından ve bir bölümü de İngiltere, Almanya, Rusya gibi ülkelerde üretilmiş olan kanat profillerinden esinlenerek geliştirilmiştir.

4.3. Türbin Kanadına Etkiyen Kuvvetler

Rüzgar gibi hava akışı içinde bulunan düz bir kanat üzerine etkiyen kaldırma kuvveti, hava akışı kanat yüzeyi üzerine 0° hücum açısı ile geldiğinde görülür. Kanat profili üzerinde havanın akış yönüne göre oluşan küçük açılarda, akış şiddetinin artmasından dolayı, akış altı olarak adlandırılan düşük basınçlı bölgeler oluşur. Bundan dolayı hava akış hızı ile basınç arasında bir ilişki meydana gelir. Hava akışı hızı arttıkça basınç azalır, hava akış hızı azaldıkça basınç artar. Bu duruma Bernoulli etkisi adı verilmektedir. Kaldırma kuvveti kanat üzerinde yukarı yönlü çekme oluşturur.



Şekil 4.2. Türbin kanadına etkiyen kuvvetler[9]

Şekil 4.2.'de bir türbin kanadına etkiyen kuvvetler görülmektedir[9].

Burada;

$R\omega$; Yanal hız, R (yarıçap) ile ω (açısal hızı) çarpımına eşittir.

W ; Bağıl hız, yanal hız ($R\omega$) ile akış hızı (V) bileşkesine eşittir.

F_L ; Kaldırma kuvveti

F_D ; Sürüklenme kuvveti

F; Eksenel kuvvet, F_L ve F_D kuvvetlerinin bileşkesine eşittir.

α ; çarpma açısı

θ ; dönme açısı olmaktadır.

Buna göre türbin güç katsayısı (C_p) ; türbinin ürettiği gücün türbine gelen rüzgar gücüne oranı olarak tanımlanır.

$$C_p = \frac{P_t}{P_r} \quad (4.4) \text{ Burada ;}$$

$$P_t = T \cdot \omega \quad (4.5) \text{ T; türbinin ürettiği tork (N.m)}$$

ve Rüzgar gücü P_r ;

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (4.6) \text{ formülü ile hesaplanır.}$$

4.4. Gorlov Türbini

Gorlov türbini, Darrieus türbininde bir gelişme olarak 1990'larda Alexander Gorlov tarafından sunuldu. Her iki tasarım da, tüm akışkan akış yönlerinde tek yönlü dönme özelliği olan dikey eksenli cihazlardır. Gorlov türbini, enerji dönüşümü için dönen kanatlar üzerinde bir kaldırma kuvvetinin katkısını kullanması nedeniyle de Darrieus tasarımının bir uzantısıdır. Bu mekanizma, türbinin dönme hızlarının kuvvet türbininin serbest akış hızını potansiyel olarak aşmasına izin verir. Gorlov'un Darrieus tasarımında yaptığı temel değişiklik, kanat kesit alanlarını yatay düzlemde silindirin yatay düzleminin çevresine eşit olarak dağıtmaktır. Bu, kanat konumlarının, toplam kanat sayısı arasında, türbinin çevresinin bir devrini tamamlayan bir helis ile tespit edilmesiyle elde edilir. Türbin dönerken herhangi bir zamanda, yatay daireye göre hareket eden bir kanat kesiti vardır. Bu, Gorlov türbininin Darrieus türbinine kıyasla iki ana özelliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir: Kendi kendine çalışma performansı ve tork davranışı.

Gorlov türbini tasarımı avantajlıdır, çünkü her zaman akışkan akışına göre tüm pozisyonlarda yönlendirilmiş bir kanatın bir kesiti olmasıyla, kendiliğinden başlama olasılığı en üst düzeye çıkarılır. Türbin devri olarak torktaki dalgalanmaların azaltılması, Gorlov helis tasarımının Darrieus tasarımına göre ikinci önemli avantajıdır. Azaltılmış tork dalgalanmalarının birincil avantajı daha fazla güç üretimi, daha az titreşim ve daha düşük döngüsel gerilimdir. Rotor kanatlarının helisel düzeni, aşağıdaki özelliklerle sonuçlanan Darrieus tipi türbinin performansını önemli ölçüde değiştirir:

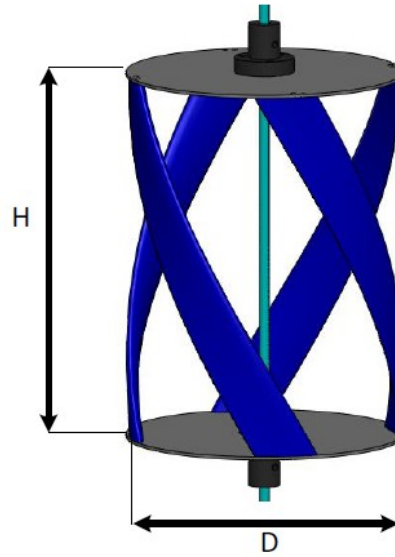
- a. Yavaş akışkan akışında (düşük basınçlı akışkanlar) yüksek hızlı düzgün dönme,
- b. Tersinir akışkan akımlarında tek yönlü dönme,
- c. Yüksek verim,
- d. Torkta dalgalanma olmaz,
- e. Yüksek dönüş hızı için akışkanda gözle görülür kavitasyon belirtisi olmaz,
- f. Yavaş sularda veya rüzgarda kendi kendine başlangıç.

Helisel türbin, güç kaybı olmadan aynı anda uzunluğunu artırırken çapını azaltmaya izin verir. Bu, bir elektrik santralinin tasarımına geleneksel yaklaşıma etkileyebilecek türbinin ilginç ve avantajlı bir özelliğidir. Herhangi bir yüksek hızlı hidrolik veya gaz türbini, maksimum güç çıkışına karşılık gelen bir dayanım sınırına sahiptir. Doğrusal hız, dönen bir rotorun çevresi üzerinde maksimum değerine ulaştığından, torkun büyük kısmının, dönme merkezinden en uzak türbinin parçaları tarafından geliştirildiği açıktır. Bu, mühendislerin, rotorun dış sınırı boyunca yerleştirilmiş çok sayıda kısa kanatlı maksimum çaptaki türbinleri tasarlamaya çalışmasının nedenlerinden biridir. Türbin çapı büyüdükçe, aynı açısız hız için güç çıkışı ve kanatların aynı şekli ve boyutları artar. Bununla birlikte, merkezkaç kuvvetleri ve diğer dinamik etkilerin neden olduğu yapısal arıza olasılığı nedeniyle türbinin çapının ne kadar artırılabilmesine dair sınırlamalar vardır. Akışkan akış yönünün bağımsızlığını, tüm çevrim boyunca titreşimsiz rotasyonu ve yüksek verimi içeren türbinin performans özellikleri, helisel kanatlı türbini rüzgar enerjisi sistemlerinde uygulama için mükemmel bir aday haline getirir. Bu türbin, rüzgar enerjisi kullanımlarında suda olduğu gibi aynı özellikleri göstermelidir. Bununla birlikte, rüzgar için dizaynı, farklı hava yoğunluğu, viskozite, kullanım şartları ve dönme hızı nedeniyle optimizasyon için farklı bir yaklaşım gerektirir. Tek büyük çaplı kanatlı yüksek kule kullanan geleneksel bir rüzgar enerjisi sistemi ile karşılaştırıldığında, helisel kanatlı türbin rüzgar uygulamaları için aşağıdaki avantajlara sahiptir:

- Rüzgar yön değişirse bile aynı yönde döner,
- Darrieus rüzgar rotorunun aksine sabit rüzgar hızında titreşmez,
- Rüzgâr çiftliğinin bakımı basittir, çünkü sistemdeki herhangi bir türbin kolayca sökülüp değiştirilebilir.

- Aynı büyüklükteki nispeten küçük standart helisel kanatlı türbinler, farklı güç kapasitelerine sahip rüzgar santralleri için kullanılabilir.

Helisel kanatın avantajlarından biri, bir Darrieus türbini ile karşılaştırıldığında türbinin kendi kendine çalışmasını geliştirmesidir. Helisel kanat şekli türbinin dönme çevresi boyunca süpürüldüğü için, kanat profiline bir kısmı statik veya yavaş dönen şartlarda bile optimum saldırı açısına yerleştirilir, bu da türbine azimut konumuna daha az bağımlı olan daha düzgün bir başlangıç torkuna izin verir. Ayrıca diğer bir avantaj; helisel kanat şekli sayesinde, dönme sırasındaki tork salınımının azaltılmasıdır. Bir Darrieus türbini, ayrı kanat konumları arasındaki çevresel boşluk alanından kaynaklanan tork salınımını deneyimleme eğilimindedir. Çevresi etrafında tam bir kanat sargısı olan bir helis kanatlı türbin bu sorunu yaşamaz; gerçekte bazı değişikliklerin ortaya çıkması muhtemel olmakla birlikte, eşit kanat kapsamı, uç etkilerini ve uyanma dinamiklerini göz ardı ederek, ideal olarak türbine tam düzgün bir tork verir.



Şekil 4.3. Gorlov Türbini Tasarımı

Bir helisel kanatlı türbinin optimum tasarımı, bir kısmı sarmal şekle özgü olan diğer türbin tasarımlarıyla tutarlı olan birkaç tasarım parametresinin incelenmesini gerektirir. Helisel kanatlı türbin için tasarım parametrelerinin bir kısmı

birbirine bağlıdır. Parametre değerlerinin makul seçimi daha verimli bir tasarıma yol açacaktır. Şekil 4.3.'te tipik bir Gorlov Türbin tasarımı görülmektedir. Bu tasarımda yer alan ve Gorlov türbinini tanımlayan parametreler şunlardır;

H (Yükseklik); Türbin kanatlarının oluşturduğu silindirin yüksekliğidir.

D (Çap) ; Türbin kanatlarının oluşturduğu silindirin çapıdır. $D = 2R$

n ; Türbin kanat sayısıdır.

c ; Kiriş (veter) uzunluğudur.

δ ; Kanat Yükselme açısıdır.

Belirli bir kesit alanı için (H ve D'nin çarpımı), daha büyük bir en boy oranı ($= H/D$) daha uzun kanat uzunluğu gerektirir. Uzunluk arttıkça, kanatların üzerindeki sapmayı, titreşimi ve gerginliği azaltmak için orta açıklıktaki kanat desteğinin göz önünde bulundurulması gerekir. Dikey eksenli bir türbin için olan helisel yükselme açısı, kanatın yatay bir düzlemle yaptığı perde açısı anlamına gelir. Bu analiz için, sadece sabit eğim açıları göz önünde bulundurulur, eğim açısının kanat uzunluğu boyunca değişmesi mümkündür. Helisel eğim açısı arttıkça, türbinin performansı, düz uçlu bir Darrieus türbininin eğim açısı olan, 90 derecelik bir eğim açısı ile düzeldir.

Kanatların sayısı doğrudan katılıkla orantılıdır. Herhangi bir türbin için, kanat sayısı arttıkça, istenen bir katılık oranını korumak için bir kanatın kiriş uzunluğu azaltılmalıdır. Buna karşılık, sabit kiriş uzunluğu için, genel türbin katılığı, kanat sayısı arttıkça artacaktır. Eğer katılığın artmasına izin veriyorsa, artan kanat sayısı artan başlangıç torku, daha düşük bir çalışma ucu hız oranı ve daha düşük genel güç performansı ile sonuçlanmalıdır.

Kanat eğimi, kanat profili kanat kirişinin türbinin dönme çemberine teğet bir çizgi ile yaptığı açıya karşılık gelir. Yarım kiriş noktasına göre atıf yapıldığında, bu pozitif bir perde, yani kanat ön yarım kirişinin teğet çizgisinden dönme merkezine doğru bir açı yaptığını belirtir. Negatif bir kanat aralığı için, kanat ön yarı kiriş teğet çizgisine göre dönme merkezinden uzaklaşır. Mesafesinin ucuna monte edilmiş düz uçlu bir Darrieus türbini için, kanat eğim açısı, basitçe kanatları kanat montaj noktasına göre döndürerek ayarlanabilir. Bununla birlikte, helisel türbin için, kanat

aralığı kanat geometrisi ile tanımlanır; kanatlar üretildikten sonra kanat adımı değiştirilemez.

Tüm bu değerlere bağlı olarak türbin Katılık Oranı (Solidity Ratio – σ) ve Uç Hız Oranı (Tip Speed Ratio – λ) aşağıdaki formüllerden hesaplanır.

$$\sigma = \frac{n \cdot c}{\pi \cdot D} \quad (4.7)$$

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{V} \quad (4.8)$$

Türbin performansını önemli ölçüde etkileyen bir diğer önemli parametre ise katılık oranıdır. Katılık, türbin kanatları tarafından alınan türbinin ön bölgesinin yüzdesidir. Daha yüksek katılık oranına sahip türbinler düşük uç hızlarında en yüksek verimlilik çalışmalarına sahip olma eğilimindedir. Ek olarak, katılık oranının başlangıç torku üzerinde büyük bir etkisi olabilir ve daha yüksek bir katılık oranı başlangıç performansını artırır. Belirli bir rotor çapı için, katılık, kiriş uzunluğunun ve kanat sayısının bir fonksiyonudur. Kanatların sayısı türbinin katılığına bağlıdır. Katılık, türbin kanadı alanının türbin süpürme alanına oranıdır. Bir rüzgar türbininin rotoru üzerindeki kanat sayısının artırılması, güç çıkışını artırır, ancak azalan dönüşlerle her bir ilave kanat için daha küçük bir fayda sağlar. Kanat sayısındaki artış, çalışma aralığını ve optimum uç hızı oranını da azaltır.

Katılık oranı, türbinin “sağlamlığı” miktarını ifade eder. Katılık oranı, boş alan olan ve katı madde olan türbin süpürme alanının miktarını ifade eder. Yüksek katılık oranına sahip bir türbin (örneğin, $\sigma > 0.3$) daha kolay bir şekilde kendiliğinden çalışmaya başlayacaktır. Ancak daha düşük bir uç hız oranında çalışacaktır, oysa düşük katılık oranına sahip bir türbin (örneğin, $\sigma < 0.15$) başlaması daha zor olabilir ancak daha yüksek bir uç hızı oranı ile çalışacaktır. Katılık azaldıkça, türbin tepe verimi daha yüksek bir uç hızı oranına kayar. Düşük katılıklı türbin aynı zamanda daha düşük devir hızına ve daha yüksek bir devir hızında çalışmasına izin veren türbinde daha yüksek akış hızına izin vererek, serbest akışa daha az engel oluşturur. Türbin daha küçük hidrodinamik kaldırma kuvvetleri oluşturur ve bu nedenle düşük

hızlarda daha az tork üretir. Helisel kanatlı bir türbin için, türbin güç verimliliği için optimum katılık oranı 0.3 – 0.4'tür.

Türbin kaynaklı hızın serbest akış hızına oranı, türbin Uç Hız Oranı olarak adlandırılır. İndirgenen hız, kanatın ana eksen etrafında dönmesiyle indirgenen hız vektörüdür ve her zaman kanatın hız vektörüne paralel değildir. Uç hız oranı, rüzgar türbini tasarımında en önemli faktörlerden biridir. Daha yüksek uç hız oranı, daha düşük bir maksimum saldırı açısına neden olur. Daha yüksek bir uç hızı oranı daha verimli jeneratör entegrasyonuna izin verir, ancak daha yüksek uç hızı oranı mutlaka daha yüksek güç katsayısına eşit olmaz.

Türbin güç katsayısı C_p , türbin kullanımının en iyi avantajı sağlayıp sağlayamayacağını belirleyen ana parametredir. Teoride, Betz limitine göre maksimum verimlilik % 59,3'ü geçmemektedir. Bununla birlikte, güç katsayısı, uç hız oranı ile doğrudan orantılıdır. Türbin ortalama güç katsayısı düşük uç hız oranlarında oldukça düşük değerlere sahiptir; yaklaşık uç hız oranı = 2.5'te olan maksimum seviyesine ulaşana kadar yüksek uç hız oranlarına doğru hızla yükselir. Sonra uç hız oranı arttıkça yavaş yavaş azalır. Türbinin ortalama güç katsayısının değişim oranı uç hız oranına göre değiştiğinden, bu parametreyi etkileyen baskın faktörler her uç hız oranında farklı olabilir.

Uç Hız Oranı, rotor kanadı açısız hızı ile bağıl rüzgar hızı arasındaki ilişki olarak tanımlanır. Bu parametre, rotoru maksimum verim için tasarlarken en önemli faktördür ve diğer parametreler uç hızı oranına göre seçilir. Teorik olarak, verimlilik, tork, mekanik gerilme, aerodinamik ve gürültü gibi optimum uç hızı oranı özelliklerini seçmek için dikkate alınmalıdır. Türbin verimliliği, seçici olarak daha yüksek uç hız oranları ile artırılabilir ancak uç hızları arttıkça, gürültü, aerodinamik ve merkezkaç gerilimi artar.

Daha yüksek uç hızları, dar kanat profillerine yol açan sırayla azaltılmış giriş genişliklerini gösterir. Bu malzeme kullanımı ve üretim maliyetlerini azaltır. Bununla birlikte, yüksek uç hızları için santrifüj ve aerodinamik gerilim artar. Arttırılmış kuvvetlerle türbinin yapısal dayanımı azalır ve çalışmama durumu ile sonuçlanır.

Yüksek uç hızlarında çalışmak üzere tasarlanan kanatlar, düşük rüzgar hızlarında daha az tork geliştirir ve bu da kendiliğinden başlama ve daha yüksek devreden çıkma hızlarında olduğu gibi çeşitli zorluklarla sonuçlanır. Ayrıca, güçle orantılı olarak gürültü artar. Enerji dönüşüm sisteminin optimum tasarımı için, iki kanatlı türbin için 9 – 10 ve üç kanatlı türbin için 6 – 8'lik uç hızı oranı seçilmiştir.

Kanat profili şekli, bir akış yüküne maruz kaldığında, gelişen basınç kuvvetleri nedeniyle performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Kanat tasarım parametrelerinin bazıları, kiriş uzunluğu, ön kenar profili, arka kenar profili, kanat kalınlığı-kiriş oranı, maksimum kalınlığın konumu ve kanat kamburunu içerir. Kanat kiriş hattı, kanatın ön kenarını kanatın arka kenarına bağlar. Kanat kamburu, uzunluğu boyunca bir kanatın ortalama kalınlığının konumunu belirtir. Simetrik, kambursuz bir kanat için kambur çizgisi ve kiriş çizgisi birlikte doğrusaldır. Geleneksel olarak, dikey eksenli türbin kanatları, çok sayıda Reynolds sayısı için kaldırma ve sürüklenme verilerinin mevcut olması nedeniyle, genel NACA – 4 basamaklı seri simetrik profillerle tasarlanmıştır. Üretilen kaldırma kuvveti açısından, simetrik kanatlar (NACA 0015 veya NACA 0018 gibi), hücum açısı negatif olduğunda asimetrik kanatlara göre daha yüksek tork üretir.

NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) profilleri, rüzgar enerjisi ve deniz akımı enerjisinde kanıtlanmış bilimsel analizinden bu yana kanat profilleri olarak kabul edildi. Kanat profili yüzeyindeki basınç dağılımı, minimum basınç katsayısı (C_p), Kaldırma katsayısı (CL), Sürüklenme katsayısı (CD) ve Sürüklenme Oranı (CL/CD) gibi hidrodinamik özellikler, kanat profili seçimi için dikkate alınmalıdır. NACA00XX serisi kanatların simetrik şekli kanatın iki yönlü hareketini sağlar. Profilin kalınlığı, kanatın üzerine etkiyen kuvvetleri arttırmaktadır, bunun nedeni kanatın alt ve üst yüzeyi arasında yaratılan basınç farkının artmasıdır.

NACA 0018 kanat profili, % 18 genişlik-kalınlık oranına sahip simetrik bir kanattır. Araştırmacılar daha önce bu kanat profilini kullanmışlar ve iyi bir yapısal destek ve performans dengesi sağladıklarını belirtmişlerdir. NACA 0018, daha önce yapılmış rüzgar ve deniz türbini tasarımlarında sık rastlanan simetrik bir kanat profilidir. Türbinin kaldırma ve çekme özellikleri iyi bilinmektedir ve Sandia

National laboratuvarları tarafından deneysel sonuçlar yayınlanmıştır. NACA 0018, daha ince kanatların geliştirilmiş performansı ile daha kalın kanat profillerinin dayanıklılığı ve üretilebilirliği arasında bir ortam sunar. Helisel kanatlı türbinin iyi bir kendi kendine çalışmaya başlama kabiliyeti, kendi kendine çalışmaya başlamayı arttırmak için özel bombeli bir bıçak tasarımına duyulan ihtiyacı azaltır.



5. TÜRBİN KANADI MODELLEME ve SAYISAL ANALİZ

Bir rüzgar türbinin verimi, türbin kanatlarının üzerine gelen rüzgarın yönü ve hızı ile doğrudan ilişkilidir. Doğada rüzgar çok farklı yönlerden farklı hızlarda esmektedir. Bu yüzden rüzgar türbinleri için özel olarak tasarlanmış, yüksek güç ve verim sağlayacak kanat profili şekillerine ihtiyaç vardır. Bu nedenle rüzgar enerjisinden en iyi şekilde yararlanmak için, türbin tasarımı yapan mühendisler için kanat profili şekillerinin tasarımı önemli bir konu olmaktadır.

Bu yüzden rüzgar türbini kanat profillerinin belirlenmesinde, uçaklarda kullanılan kanat profillerine benzer kanat profillerinin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bu kanat profilleri farklı hava hızlarında ve farklı hücum açılarında farklı performans eğrileri göstermektedir. Kullanım amacına göre kanat profilleri rüzgar tünellerinde test edilir ve performansları ölçülür. Rüzgarın farklı hızlarda ve farklı açılarda kanat üzerine gelmesi, kanat performanslarını etkilediğinden her durumda en iyi performansı verecek bir kanat profili bulmak gerekmektedir. Birçok farklı uygulama için birçok farklı rüzgar türbini kanat profili tasarımı yapılmasına rağmen daha yüksek verimli rüzgar türbinleri oluşturmak için yeni kanat profillerinin araştırılması gerekmektedir.

Bu aşamada bize yardımcı olacak ilk çalışma olan, Almanya'nın aerodinamik merkezi Göttingen'de kurulan ve yirminci yüzyılın ilk çeyreğinde tam ölçekli kanat profilleri ile gerçekçi hızlarda deneyler yapabilen bir rüzgar tünelinin yardımıyla Ludwig Prandtl tarafından kanat profil eğrilerini modelleyen matematiksel bir yöntem geliştirilmiştir. Böylece bu çalışmalara kadar kullanılan çok ince kanat profillerinin tersine daha kalın, hücum kenar yarıçapı daha büyük olan kanat profillerinin ince kanat profillerine olan üstünlükleri bulunmuştur. Diğer yandan bu çalışmalara gelene kadar geliştirilen birçok kanat profili ilgili veriler, düşük reynolds sayılarına dayandıklarından tam ölçekli uygulamalar için yeterli değillerdi.

Bugün birçok alanda kullanılan kanat profillerinin şekilleri doğrudan veya dolaylı olarak Almanya'da geliştirilen çok sayıda kanat profilleri üzerine yapılmış bu araştırmaların sonuçlarına dayanmaktadır. 1930'lara gelindiğinde ise ABD'de kısaca NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) olarak anılan, Ulusal

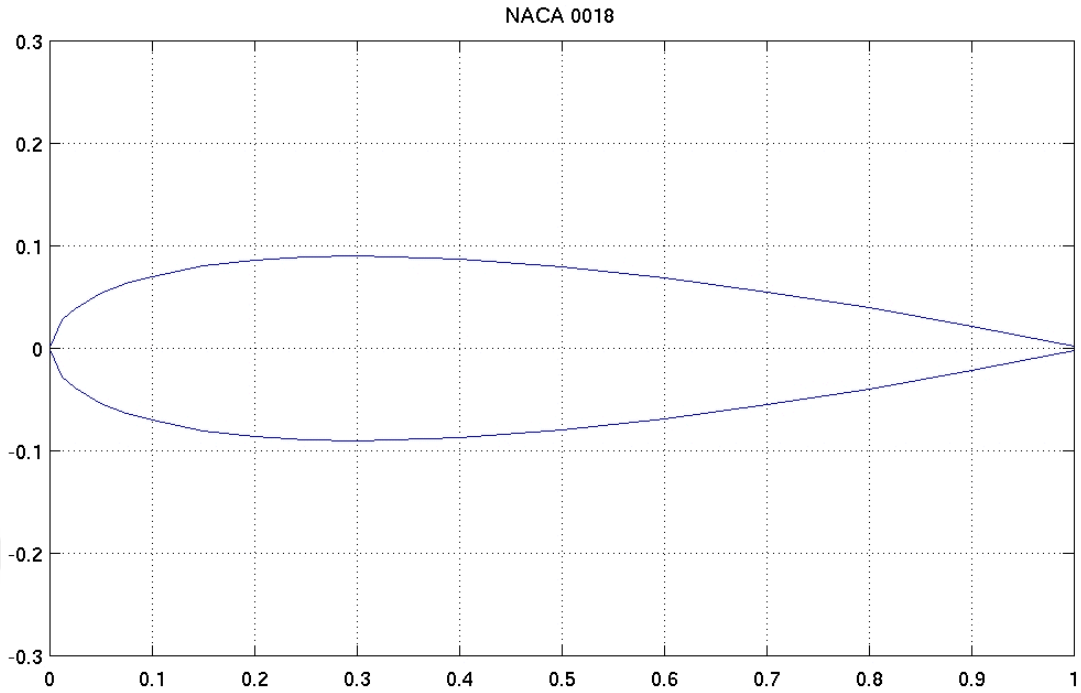
Havacılık Danışma Kurulu tarafından matematiksel olarak tanımlanmış bazı kanat kesit ailelerinin geliştirilmesine başlanmıştır. Çoğu 1930'lu ve 40'lı yıllarda yapılan çalışmalarla meydana getirilen bu kesitler günümüzde de referans olarak NACA formu adı altında kullanılmaktadır.

Teknolojik ilerlemeyle, hem geleneksel havacılık hem de rüzgar türbini teknolojisi için kanatların geliştirilmesi için çok sayıda kanat profil şekli mevcuttur. Rüzgar enerjisi sistemleri için özel kanatlar tasarlanmıştır. Küçük rüzgar türbinlerinde kanatların şekli büyük rüzgar türbinlerinde olduğu kadar kritik değildir. Bununla birlikte, küçük rüzgar türbinlerinde kullanılan kanatlar, sürüklenme katsayısının kaldırma katsayısından çok daha düşük olması gereken düşük açıda bile çalışabilmelidir. Kanat geometrisini tasarlamak için, genel olarak NACA serisi kanatlar kullanılır. Bir rüzgar türbininin rotor kanatlarını tasarlamak için seçilen NACA kanat profili aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır:

- Yüksek kaldırma katsayısı ve düşük sürüklenme katsayısı;
- Kontrollü durma özellikleri;
- Optimum kanat kalınlığı;
- İhmal edilebilir adım momenti katsayısı;
- Düşük Reynolds sayısı rüzgar koşullarında çalışabilme becerisi;
- Kanat kök kısmında sağlamlık.

Kanat geometrisi tasarımı için gerekli parametreler göz önüne alınarak, optimum aerodinamik performans için NACA 0016-64 serisi kullanılabilir. Bu uçak kanat serisi, istenen Reynolds sayısı ve yüzey koşulları aralığında pratik olarak test edilir.

5.1. Türbin Kanatlarının Çizimi



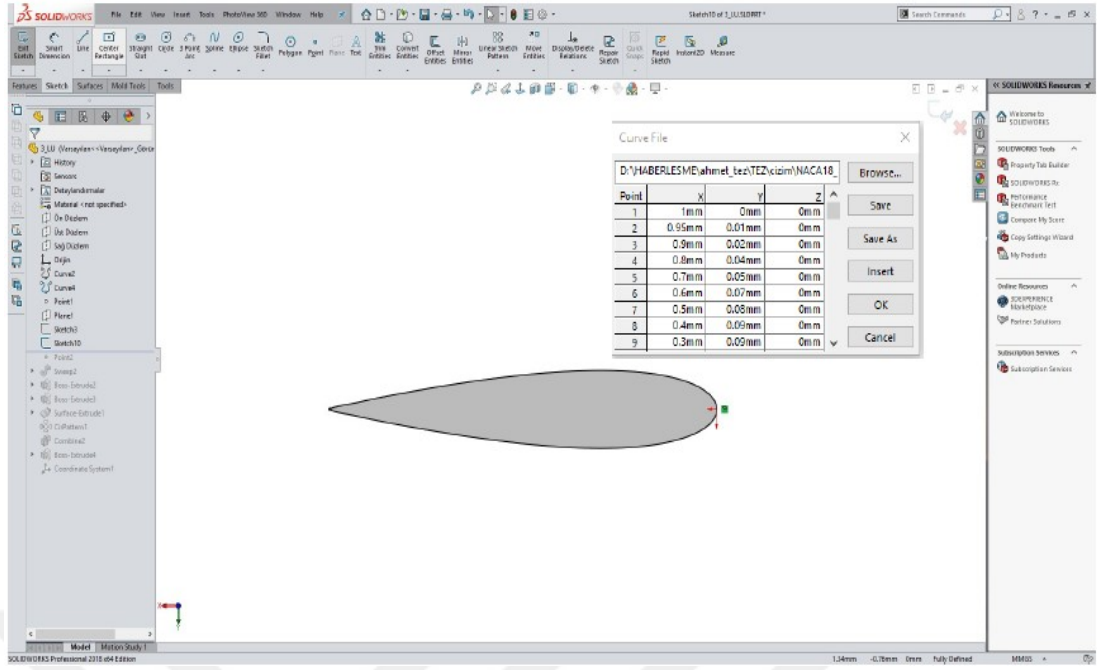
Şekil 5.1. NACA 0018 Kanat Profili

Bu çalışmada simetrik yapısı nedeni ile ve yüzey basıncı dağılım özelliklerinden dolayı, küçük düşey eksenli türbin tasarımları için çok uygun olan NACA 0018 kanat profili kullanılmıştır. Şekil 5.1.'de NACA 0018 kanat profili görülmektedir. Üç boyutlu Kanat resminin çizimi için gerekli olan NACA 0018 kanat profili koordinatları airfoiltools.com internet sitesinden alınmıştır. Bu site, kanat profili koordinat değerlerini, yaklaşık 1.600 uçak kanadı profil koordinatlarını veritabanında bulunduran UIUC – Kanat Profili Veritabanı Sitesinden almaktadır. UIUC (University of Illinois at Urbana–Champaign); ABD'nin Illinois eyaletinde kurulmuş olan, araştırma ağırlıklı bir devlet üniversitesidir. Bu kurum, Illinois eyaletinin sahip olduğu ortak üniversite sisteminin başını çeken en büyük üniversitedir. Şekil 5.2.'de NACA 0018 kanat profili koordinatları görülmektedir.

NACA 0018	
1.000000	0.001890
0.950000	0.012100
0.900000	0.021720
0.800000	0.039350
0.700000	0.054960
0.600000	0.068450
0.500000	0.079410
0.400000	0.087050
0.300000	0.090030
0.250000	0.089120
0.200000	0.086060
0.150000	0.080180
0.100000	0.070240
0.075000	0.063000
0.050000	0.053320
0.025000	0.039220
0.012500	0.028410
0.000000	0.000000
0.012500	-0.028410
0.025000	-0.039220
0.050000	-0.053320
0.075000	-0.063000
0.100000	-0.070240
0.150000	-0.080180
0.200000	-0.086060
0.250000	-0.089120
0.300000	-0.090030
0.400000	-0.087050
0.500000	-0.079410
0.600000	-0.068450
0.700000	-0.054960
0.800000	-0.039350
0.900000	-0.021720
0.950000	-0.012100
1.000000	-0.001890

Şekil 5.2. NACA 0018 Kanat profili koordinatları

Üç boyutlu kanat resminin ve düşey eksenli türbinin çizimi için Solidworks çizim programı kullanılmıştır. İlk önce yukarıdaki NACA 0018 kanat profili koordinatları kullanılarak kanat profili çizilmiştir. Bu amaçla Solidworks programında, katı veya yüzey formlarından üç boyutlu eğriler çıkartılmasında kullanılan Eğriler (Curves) Araç çubuğunda buluna XYZ Noktaları ile Eğri Oluşturma (Creating Curves Through XYZ Points) komutu kullanılmıştır. Bu komut Tablo içersine girilen koordinat değerlerine göre eğri oluşturmakta kullanılır. Sadece iki boyutlu çizim yapılacağı için sözkonusu tabloda Z koordinatları sıfır olarak verilmiştir. Şekil 5.3.'de Solidworks programında NACA 0018 kanat profili çizimi görülmektedir.



Şekil 5.3. Solidworks programında NACA 0018 kanat profili çizimi

Bu çalışmada, 0.30 m'lik rotor çapına sahip dikey rüzgar türbininin, ilk önce Solidworks programı ile tasarımı yapılmış ve daha sonra QBlade yazılımı ile aerodinamik performans analizi incelenmiştir. Türbin tasarım değerleri Tablo 5.1.'de görülmektedir.

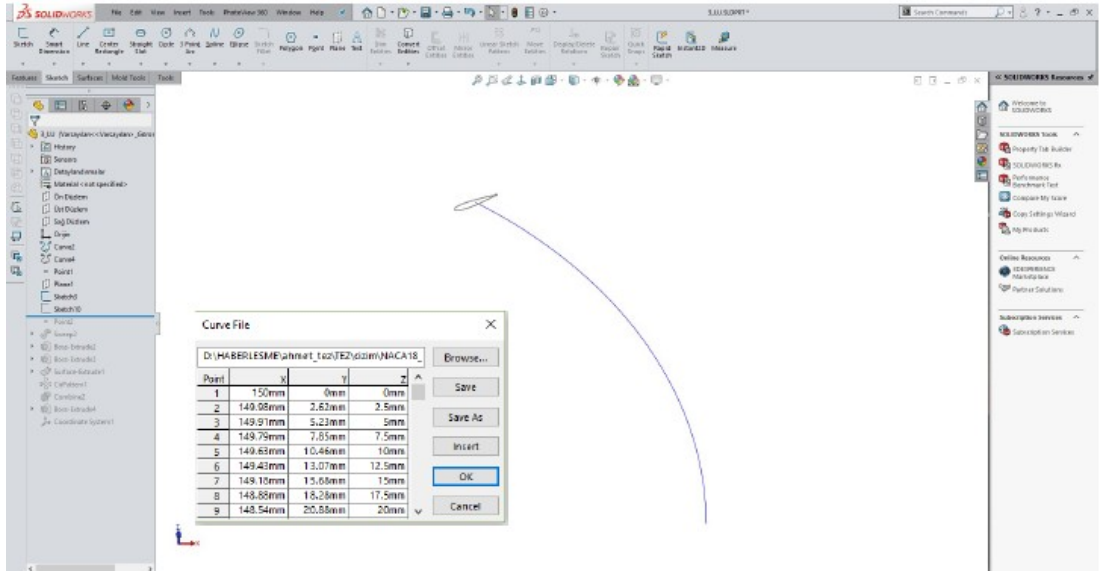
Tablo 5.1. Gorlov türbin tasarım değerleri

Kanat Profil Tipi	NACA 0018
Kanat Sayısı – n	3
Kanat Kiriş Uzunluğu (cm) – c	5.00
Çap (m) – D	0.30
Yükseklik (m) – H	0.30
Helis Yükselme Açısı (°) - δ	43.7
Helis Dönme Açısı (°) - φ	120

helis dönme açısı (φ)	helis dönme açısı (φ) radyan	X	Y	Z
1	0,017453292519943	149,98	2,62	2,50
2	0,034906585039887	149,91	5,23	5,00
3	0,05235987755983	149,79	7,85	7,50
4	0,069813170079773	149,63	10,46	10,00
5	0,087266462599717	149,43	13,07	12,50
6	0,10471975511966	149,18	15,68	15,00
7	0,122173047639603	148,88	18,28	17,50
8	0,139626340159546	148,54	20,88	20,00
9	0,15707963267949	148,15	23,47	22,50
10	0,174532925199433	147,72	26,05	25,00
11	0,191986217719376	147,24	28,62	27,50
12	0,20943951023932	146,72	31,19	30,00
13	0,226892802759263	146,16	33,74	32,50
14	0,244346095279206	145,54	36,29	35,00
15	0,261799387799149	144,89	38,82	37,50
~~~~~	~~~~~	~~~~~	~~~~~	~~~~~
~~~~~	~~~~~	~~~~~	~~~~~	~~~~~
106	1,85004900711399	-41,35	144,19	265,00
107	1,86750229963393	-43,86	143,45	267,50
108	1,88495559215388	-46,35	142,66	270,00
109	1,90240888467382	-48,84	141,83	272,50
110	1,91986217719376	-51,30	140,95	275,00
111	1,93731546971371	-53,76	140,04	277,50
112	1,95476876223365	-56,19	139,08	280,00
113	1,97222205475359	-58,61	138,08	282,50
114	1,98967534727354	-61,01	137,03	285,00
115	2,00712863979348	-63,39	135,95	287,50
116	2,02458193231342	-65,76	134,82	290,00
117	2,04203522483337	-68,10	133,65	292,50
118	2,05948851735331	-70,42	132,44	295,00
119	2,07694180987325	-72,72	131,19	297,50
120	2,0943951023932	-75,00	129,90	300,00

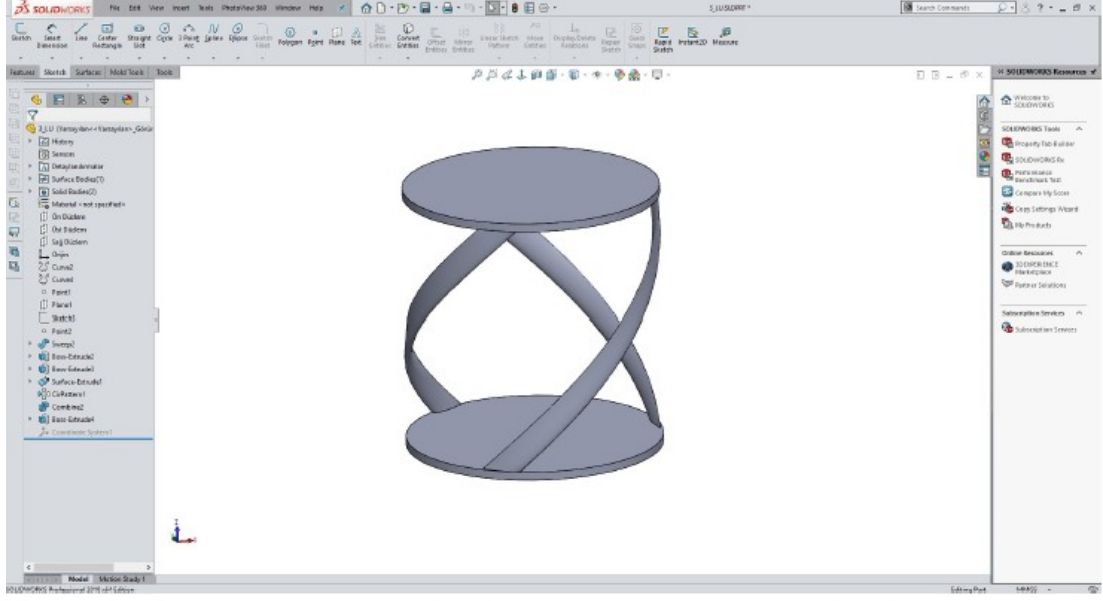
Şekil 5.5. Gorlov türbin kanadı helis eğrisinin koordinatları

Bu helis eğrisinin koordinatları kullanılarak, daha önce Solidworks programında çizmiş olduğumuz kanat profilinden, üç boyutlu türbin kanadı şeklini oluşturmak için kullanacağımız helis eğrisini, Solidworks programının Helis/Spiral (Helix/Spiral) Oluşturma komutu kullanılarak çizilir. Menü içerisinde bulunan Değişken Adımlı Helis Oluşturma seçeneği ile çizmek istediğimiz helis eğrisi koordinatları tablo olarak programa girilir ve eğri çizdirilir. Şekil 5.6.'da bu çizdirme işlemi görülmektedir.



Şekil 5.6. Gorlov türbin kanadı helis eğrisinin çizimi

Solidworks programında kanat profili ve helis eğrisi çizimleri tamamlandıktan sonra, yine Solidworks programında yer alan Süpürerek Katı Oluşturma (Sweep) komutu kullanılarak üç boyutlu kanat modeli çizilir. Bunun için komut menüsünde yer alan Profil (Profile) ve Yol (Path) seçimi kutucuklarında, Profil olarak daha önce çizmiş olduğumuz kanat profili eğrisi ve Yol olarakta yine daha önce çizmiş olduğumuz helis eğrisi seçimleri yapılır. Diğer başlangıç ve bitiş durumları da ayarlandıktan sonra Süpür (Sweep) komutu çalıştırılarak katı kanat modelimiz tamamlanır. Tasarımını yaptığımız düşey eksenli türbin modelimiz üç kanatlı olduğu için diğer kanatlar ilk çizimimizden kopyalanarak çoğaltılır ve alt ve üst olmak üzere iki adet silindirik kanat bağlantı elemanları çizilerek katı modelimiz son haline getirilir. Şekil 5.7.'de Gorlov Türbin tasarımının son hali görülmektedir.



Şekil 5.7. Gorlov türbin tasarımı

5.2. Türbin Kanatlarının QBlade Yazılımında Analizi

Rüzgar türbini tasarımında kanat sayısından çok, kanat profilinin kesit alanı büyük önem taşımaktadır. Verimi artırabilmek için maksimum CL/CD (maksimum kaldırma ve minimum sürüklenme) oranı istenmektedir. Çünkü rüzgar türbinleri kullanım ömürleri boyunca sürekli olarak aynı hava akımlarına sahip değillerdir. Hava akımından elde edilecek maksimum güç, CL/CD oranlarına bağlıdır.

Genel Kamu Lisansı altındaki QBlade yazılımı, rüzgar türbinlerinin analizi ve tasarımı için kullanılır. Bu yazılım ile rüzgar türbini performansını tahmin etmek mümkündür. Bu çalışmada, bir dikey rüzgar türbininin, ilk önce Solidworks programı ile tasarımı yapılmış ve daha sonra QBlade yazılımı ile aerodinamik performans analizi incelenmiştir.

QBlade yazılımı, rüzgar türbinlerinin simülasyonu ve tasarımı için açık kaynaklı bir program olarak geliştirilmiştir[10]. 2010 yılında QBlade yazılım projesi, Berlin Teknik Üniversitesi'nin akışkanlar mekaniği başkanlığında başlatıldı. Burada amaç; aerodinamik rüzgar türbini tasarımı ve simülasyonu için, diğer kaynaklardan elde edilen verileri içe aktarma, dönüştürme veya işlemeye gerek kalmadan gerekli tüm işlevselliği içeren tek bir araç oluşturmaktır. Ayrıca, karşılaştırılabilir simülasyon

kodlarına göre erişilebilirliği arttırmak için yazılımı uygun bir grafiksel kullanıcı arayüzüne yerleştirmekte diğer bir hedefti.

QBlade yazılımı aşağıdaki modülleri içerir[10]:

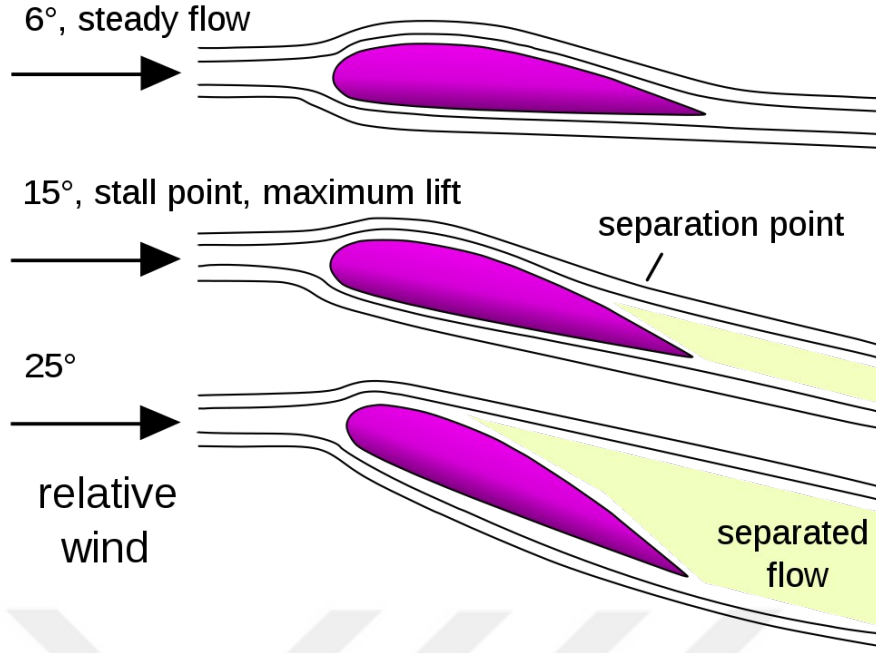
- Kanat profili tasarımı ve analizi,
- Kaldırma ve sürüklenme ekstrapolasyonu,
- Kanat tasarımı ve optimizasyonu,
- Türbin tanımlanması ve simülasyonu.

QBlade yazılımı, yatay eksen rüzgar türbini performansının simülasyonu için BEM (Blade Element Momentum) yöntemini ve dikey eksenli rüzgar türbini performansının simülasyonu için DMS (Double Multiple Streamtube) algoritmasını kullanır[10]. Özel kanat profillerinin tasarımı ve kanat profili kaldırma katsayısı ve sürüklenme katsayısı ile viskoz ve viskoz olmayan akışlarda kutuplarının hesaplanması için kullanılan ve bağlanmış panel yöntemini kullanan XFOIL yazılımı, QBlade'in grafik kullanıcı arayüzüne entegre edilmiştir. Ayrıca buna ek olarak, 360°'lik hücum açıları aralığı için, durma (stall) noktasının ötesinde kanat profillerinin ekstrapolasyonu için bir modül entegre edilmiştir. Böylece elde edilen işlevsellik, QBlade'in rüzgar türbini tasarımı için kapsamlı bir araç olarak kullanılmasına olanak tanır. Qblade yazılımı, zaman içinde yeni eklenen işlevsel birçok özellik ile sürekli olarak doğrulanmakta ve geliştirilmektedir.

Bir rüzgar türbinini simüle etmek için uygulanan BEM ve DMS algoritmaları, farklı hücum açıları üzerinden kaldırma ve sürüklenme katsayılarının tablo halinde verilmesini gerektirir. Bu veriler ya deneylerle ya da iki boyutlu akış simülasyonları ile elde edilir. Drela ve Giles tarafından 1989 yılında MIT'de geliştirilen XFOIL yazılımı, ses altı izole kanat profillerinin etrafındaki akışı analiz etmek ve hesaplamak için kullanılan bir programdır[11]. XFOIL yazılımı, bir yüksek dereceli panel yöntemi ile, tamamen birleştirilmiş viskoz ve viskoz olmayan etkileşim yöntemini birleştirir ve uygular. XFOIL yazılımı ayrıca spline veya dinamik koordinat karışımını kullanarak özel kanat profillerini tasarlama ve analiz etme yeteneğine de sahiptir.

2003 yılında Depperois, XFOIL ile grafiksel bir kullanıcı arayüzünü birleştirerek ve yazılımı FORTRAN'dan C ++ 'a taşıyarak XFLR5 programını yazdı[12]. XFLR5 yazılımı, kanat tasarımı için iki boyutlu kanat profili koordinatlarını ve türbin simülasyonları için kanat profili kaldırma ve sürüklenme katsayılarını oluşturmak için, tüm işlevselliği ile birlikte QBlade'e sorunsuz bir şekilde entegre edilmiştir.

Rotorun aerodinamik performansı, dönüşüm verimliliğini düzenleyen temel faktördür. Rotor kanatları döndüğünde, kanatlara etki eden iki kuvvet kaldırma ve çekme kuvvetidir. Üst ve alt kanat profili bölümleri arasındaki fark basıncının bir sonucu olarak rüzgarın yönüne dik etki eden kuvvet, kaldırma kuvveti olarak tanımlanır. Sürüklenme kuvveti, kanat profili yüzeylerindeki viskoz sürtünme kuvveti sonucunda rüzgar akış yönü boyunca etki eder. Rotor kanadı üzerine etki eden rüzgarın hücum açısı, durma (stall) noktasına kadar sürüklenme kuvveti ile artar. Türbin kanatları, rüzgar akımını mekanik enerjiye dönüştürmek için aynı prensiplerden yararlanıldığından, uçak kanadına benzer şekilde biçimlendirilir. Rüzgar, rotor hava boşluğunun üst tarafında hareket etmek daha uzun sürdüğü ve böylece kanat ucuna ulaşmak için daha hızlı hareket ettiği için kaldırma kuvveti oluşturulur. Sonuç olarak, kanatın üst tarafında bir alçak basınç bölgesi oluşturulur ve kanat, kaldırma olarak bilinen hareket yönünde aşağı doğru çekilir. Rotor kanatları bu olayın avantajlarından yararlanmak için tasarlanmıştır. Hücum açısı, rotor kanadı üzerindeki rüzgarın açısı veya rüzgar akış yönünü ve kanatın giriş çizgisini temsil eden vektör tarafından yapılan açıdır. Hücum açısı arttığında, kaldırma hareketinde durma (stall) olarak tanımlanan anlık bir azalma olur. Kritik açı, hava kanadının tasarımına ve Reynolds sayısına bağlıdır. Durma nedeniyle, hava düzensiz bir girdapta, türbülansa neden olan türbin kanatlarının etrafında döner. Durma nedeniyle oluşabilecek kayıpları önlemek için rüzgar türbini kanatlarını tasarlarken bu durum incelenmeli ve dikkate alınmalıdır. Şekil 5.8.'de Türbin Kanatlarında Durma (Stall) oluşması görülmektedir.



Şekil 5.8. Türbin kanatlarında durma (stall) oluşması

XFOIL algoritması, potansiyel akış teorisine dayanmaktadır ve bu nedenle durmadan (stall) hemen öncesi ve hemen sonrasında kalan açılarda kaldırma ve sürüklenme katsayılarını tahmin etmekle sınırlıdır. Çok yüksek veya düşük hücum açıları için algoritma yakınsamaz. Ancak, HAWT ve VAWT türbinleri, genel olarak işletme sırasında çok yüksek veya düşük hücum açıları görebilir. BEM ve DMS algoritmalarının düzgün çalışmasını sağlamak için, XFOIL tarafından üretilen veya aktarılan kanat profillerinin, 360° hücum açısının tamamı ile aktarılması gerekir. HAWT veya VAWT türbin performansı simülasyonları bu ekstrapolasyona karşı çok hassastır[13].

QBlade, rüzgar türbinlerinin simülasyonu için Blade Element Momentum (BEM) yöntemini kullanır ve XFOIL kanat profili tasarımı ve analizi ile entegre edilmiştir. Rüzgar türbininin aerodinamik performansını deneysel, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ve Blade Element Momentum (BEM) yöntemleri kullanarak tahmin etmek mümkündür. Deneysel ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) yöntemleri daha pahalıdır ve Blade Element Momentum (BEM) yönteminden daha uzun sürer. Ancak, BEM yöntemi bazı varsayımlar nedeniyle deneysel ve CFD yöntemlerinden daha az kesinliğe sahiptir.

Blade Element Momentum (BEM) teorisi, aerodinamik performans tahminlerinde ve rüzgar türbinleri için tasarım uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teori hem momentum teorisi hem de kanat elemanı teorisi yöntemlerini birleştirir. Momentum teorisi, ideal verim ve akış hızını öngörmede faydalıdır. Akışkanın hareketini üretmek için rotor üzerine etkiyen kuvvetler momentum teorisi ortalaması ile belirlenir. Momentum teorisi kanat geometrisine bağlı değildir. Bununla birlikte, kanat elemanı teorisi, kanat geometrisine bağlıdır ve akışkanın hareketinden sonra kanat üzerine etkiyen kuvvetleri belirler. Bu iki teori birleştirilirse, şerit teorisi olarak bilinen BEM teorisi elde edilir ve BEM teorisi, rotor performansının rotor geometrisi ile ilişkisini tanımlar. Kanat elemanı teorisi ve momentum teorisi için varsayımda bulunmak gerekir.

Kanat elemanı teorisi için:

- a) Kanat boyunca art arda kanat parçaları arasında herhangi bir giriş yoktur.
- b) Kanat elemanına etkiyen kuvvetler, sadece bir Kanat elemanının kesit profilinin kaldırma ve sürüklenme özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

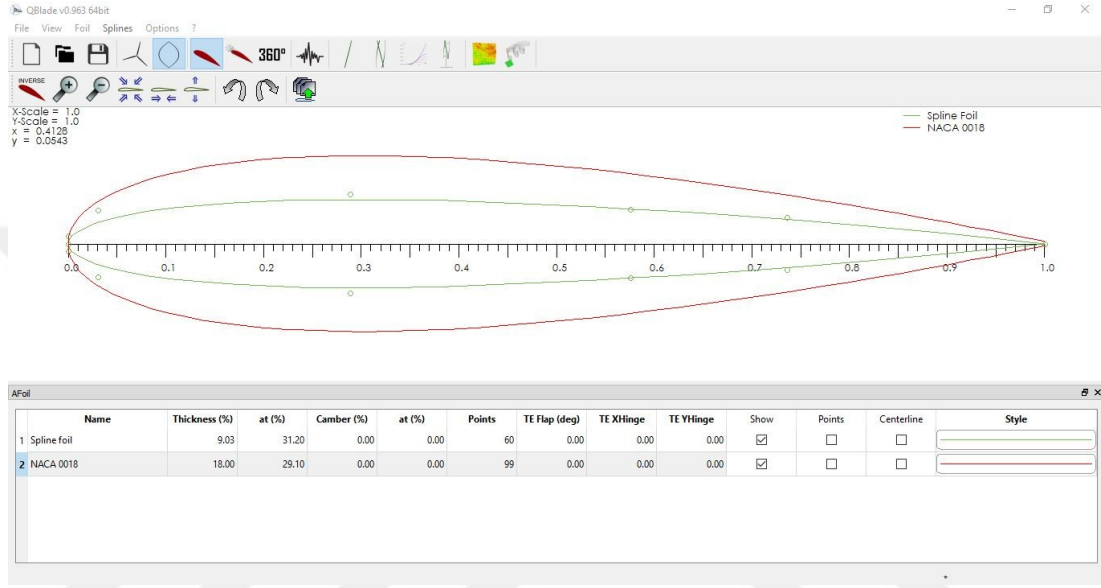
Momentum teorisi için:

- a) Kanat sürtünmesiz yani sürtünme olmadan çalışır.
- b) İyi tanımlanmış bir kayma, rotor diskinden geçen akışı dış diskten ayırır.
- c) Rotorun önündeki ve arkasındaki kayma akımının içindeki ve dışındaki statik basınç, kesintisiz serbest akışlı statik basınca eşittir.
- d) Baskı yükü, rotor diski üzerinde aynıdır.
- e) Disk tarafından akışa hiçbir dönüş verilmez.

QBlade yazılımının Kanat tasarım modülü, rotorların ve kanat şekillerinin verimli ve hassas tasarımına olanak sağlar[13]. Bir rotor kanatı, kanat profili modülünün içinde oluşturulan kanat profillerinin, kanatın farklı radyal (HAWT) veya yükseklikteki (VAWT) bölümleri üzerine dağıtılmasıyla tanımlanır. Geometri ayrıca giriş uzunluğu, büküm (twist) açısı, kenar veya kanat eğriliği, azimut açısı ve her bir kanatçık büküm ekseninin belirtilmesiyle tanımlanır. Rotor geometrisine ek olarak, rüzgar türbini tipi de ayrıca belirtilmelidir. Durma (stall) veya adım (pitch) kontrollü güç regülasyonu ve dönme hızı (tek veya değişken) ve devreye girme (cut in) ile

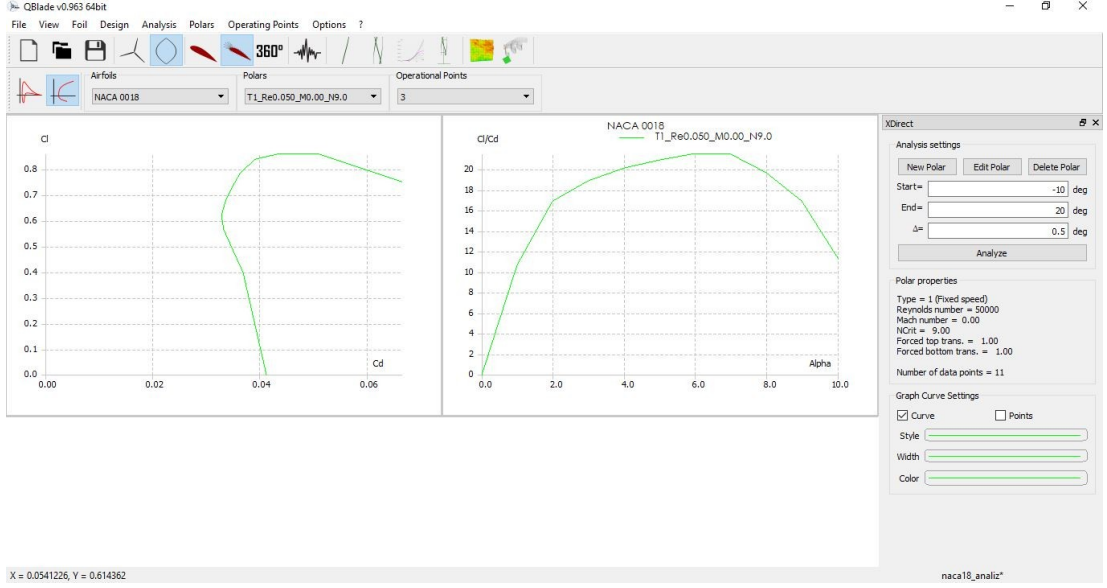
devreden çıkma (cut out) hızları veya jeneratör verimliliği gibi ek parametrelerin tanımlanması gerekir.

QBlade programında ilk olarak File/New Project seçilir. Daha sonra VAWT Mode seçili iken, Foil menüsünden NACA Foils açılır ve bizim tasarımımızda olan Şekil 5.9.'da görüldüğü gibi NACA 0018 profili seçilir.

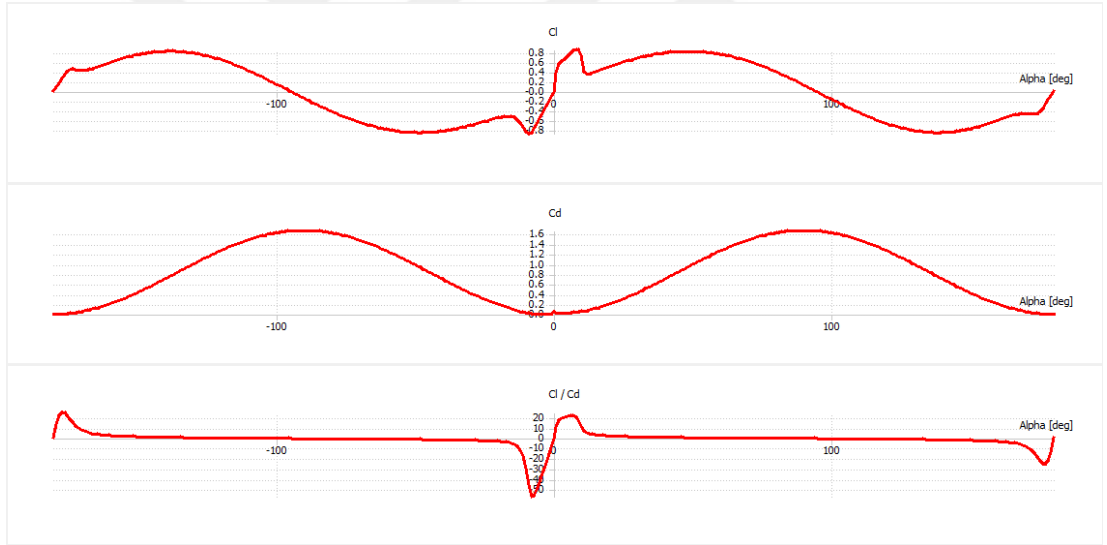


Şekil 5.9. QBlade programında NACA 0018 profil seçimi

QBlade programında kanat profil seçimi yapıldıktan sonra, VAWT Rotor Blade Design XFOIL Direct Analysis bölümüne geçilir. Burada Reynolds sayısına ve kanat hücum açısı bağlı olarak NACA 0018 kanat profili için CL – CD ve CL/CD – α değişimi analizleri yapılır. Şekil 5.10.'da Re=50.000 için hücum açısının -10° ile 20° arasındaki sonuçlar görülmektedir. Daha sonra bulunan bu sonuçlar kullanılarak bir sonraki aşamada CL – CD ve CL/CD – α değişimi 360° açı için ekstrapolasyon yapılır ve Şekil 5.11.'de gösterildiği gibi türbin kanat tasarımı için gerekli olan tüm hücum açısı için olan CL ve CD değerleri elde edilir.

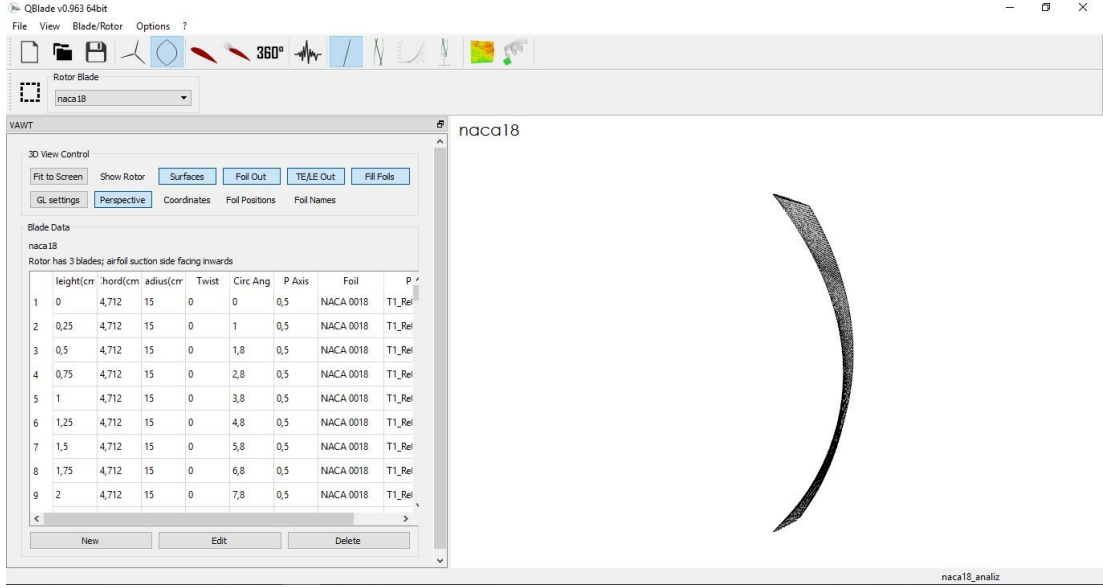


Şekil 5.10. QBlade programında CL ve CD değişimleri



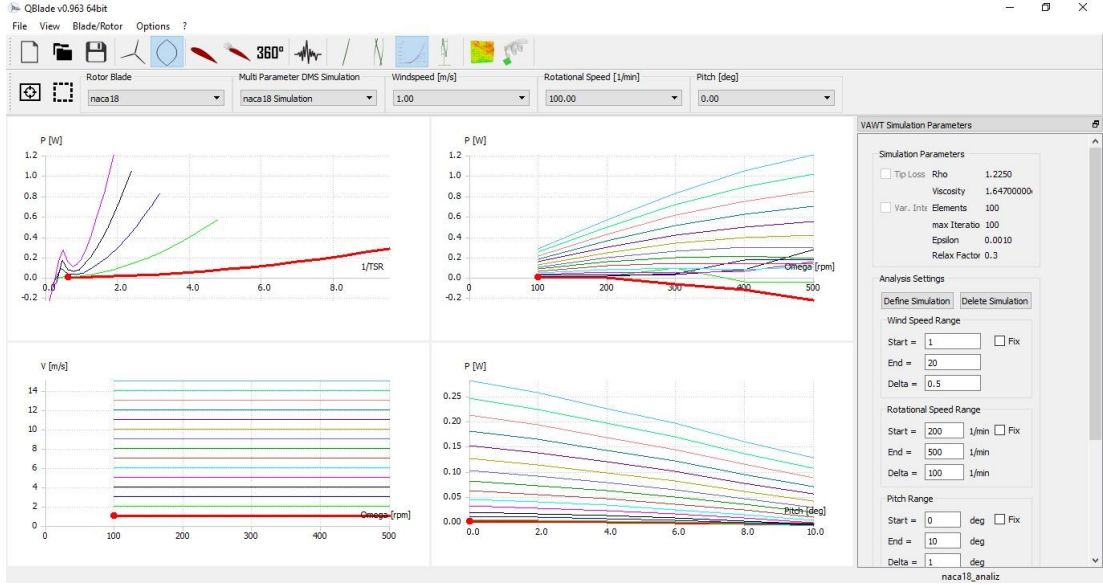
Şekil 5.11. QBlade programında 360° için CL ve CD değişimleri

QBlade programında kanat profil seçimi yapıldıktan sonra, VAWT Rotor Blade Design bölümüne geçilir. Burada Tablo 5.1.'deki tasarım değerlerine bağlı olarak kanat tasarımı yapılır. Türbin kanat tasarımı Şekil 5.12.'de görülmektedir.



Şekil 5.12. QBlade programında türbin kanat tasarımı

QBlade programında Türbin kanat tasarımı yapıldıktan sonra, Multi Parameter DMS (Double Multiple Streamtube) Simulation bölümüne geçilir[14]. Qblade yazılımında, VAWT türbinleri için olan aerodinamik simülasyon modülü, Paraschivoiu tarafından geliştirilen DMS (Double Multiple Streamtube) algoritmasını temel alır. BEM yönteminde olduğu gibi, DMS algoritması da kanat kuvvetlerini momentum dengesi ile birleştirir. Hava akımı, rotoru bir dönme esnasında yukarı akım yönünde bir kez ve aşağı akım yönünde bir kez geçtiğinden, bir VAWT arka arkaya iki HAWT olarak düşünülebilir. Ayrıca, rotor kanadı ve bağlı hız arasındaki hücum açıları, burada bir dönme sırasında çevresel açıya veya kanatların mevcut konumuna bağlıdır. Bu nedenle DMS, BEM algoritmasının biraz uzatılmış bir versiyonu olarak görülebilir. Burada önce akışkan yoğunluğu ve viskozitesi gibi simülasyon parametre seçimleri yapılır. Sonra Rüzgar hızı aralığı ve Dönme hızı aralığı gibi Analiz Ayarları yapıldıktan sonra simülasyon çalıştırılır. Şekil 5.13.'de Rüzgar hızı aralığı 1 – 15 m/s ve Dönme hızı aralığı 10 – 1000 d/dak için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir.



Şekil 5.13. QBlade programında DMS simülasyon sonuçları

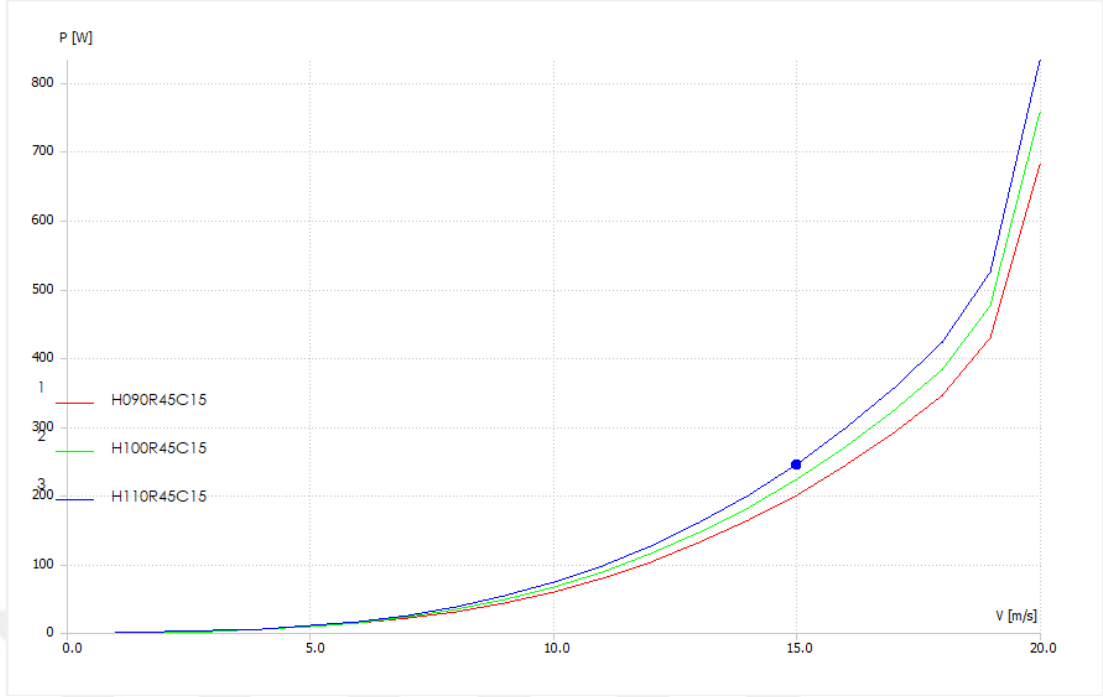
5.3. Türbin Kanat Geometrisi Parametrelerinin Performansa Etkisi

Burada, bir dikey eksen rüzgar türbininin, QBlade yazılımı ile farklı türbin kanat geometrisi parametreleri için aerodinamik performans analizi incelenmiştir. Bunun için farklı yükseklik (H), farklı yarıçap (R) ve kiriş uzunluğu (C) kanat ölçülerine sahip türbinler tablo halinde Tablo 5.2.'de sunulmuştur.

Tablo 5.2. Dikey eksen rüzgar türbinlerinin kanat geometri ölçüleri

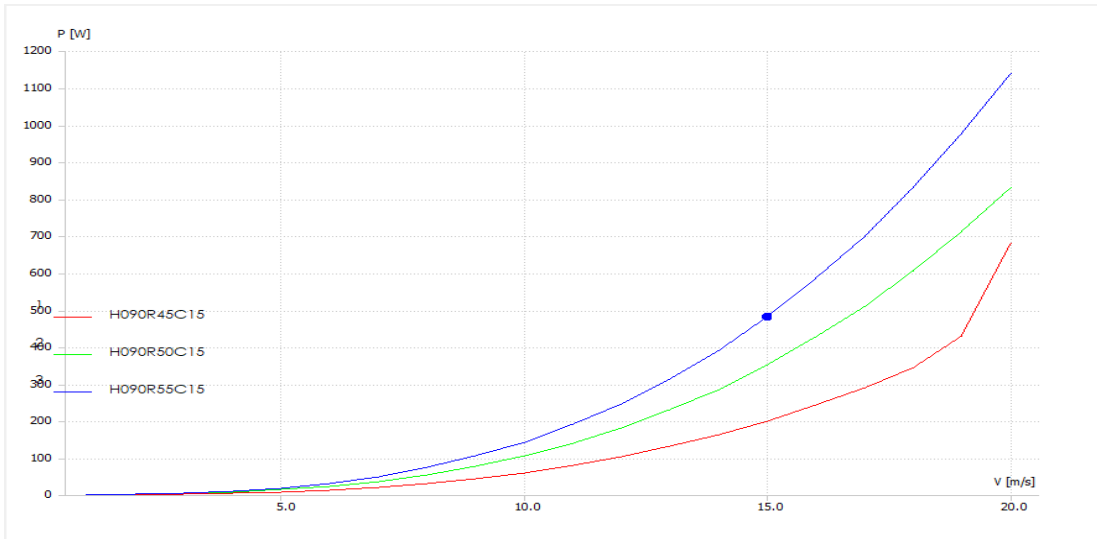
Dikey Eksen Rüzgar Türbini	Türbin Kanat Ölçüleri			Yıllık Enerji Üretimi (kWh)
	H (cm)	R (cm)	C (cm)	
H090R45C15	90	45	15	485
H100R45C15	100	45	15	539
H110R45C15	110	45	15	593
H090R50C15	90	50	15	843
H090R55C15	90	55	15	1156
H090R45C10	90	45	10	886
H090R45C05	90	45	5	1012

Şekil 5.14.'de yarıçap (R) ve kiriş uzunluğu (C) aynı fakat farklı yükseklik (H) değerlerindeki kanatlara sahip dikey eksen rüzgar türbinlerinin Güç – Rüzgar Hızı ilişkisi gösterilmektedir. Kanat yüksekliği arttıkça Türbin gücü artmıştır.



Şekil 5.14. Farklı kanat yükseklik (H) değerlerindeki türbinlerin Güç – Rüzgar hızı ilişkisi

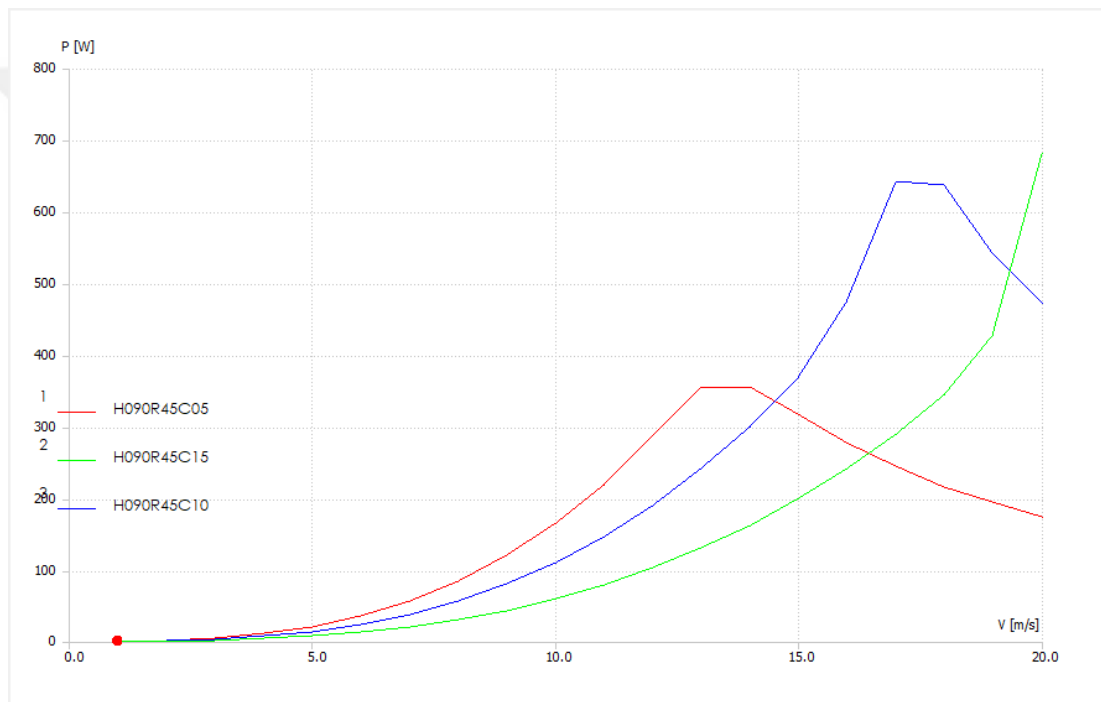
Şekil 5.15.'de yükseklik (H) ve giriş uzunluğu (C) aynı fakat farklı yarıçap (R) değerlerindeki kanatlara sahip dikey eksen rüzgar türbinlerinin Güç – Rüzgar Hızı ilişkisi gösterilmektedir. Türbin çapı arttıkça Türbin gücü artmıştır.



Şekil 5.15. Farklı türbin yarıçapı (R) değerlerindeki türbinlerin Güç – Rüzgar hızı ilişkisi

Türbin kanatların taradığı kesit alanı A ; yükseklik H ile türbin çapı D 'nin çarpımına eşittir. Şekil 5.14. ve Şekil 5.15. incelendiğinde, H ve D aynı oranda artmış olmasına rağmen, aynı kanatlara sahip olan türbinin çapının artması Güç'te daha fazla artış sağlamıştır.

Şekil 5.16.'da yükseklik (H) ve yarıçap (R) değerleri aynı fakat farklı kiriş uzunluğu (C) değerlerindeki kanatlara sahip dikey eksen rüzgar türbinlerinin Güç – Rüzgar Hızı ilişkisi gösterilmektedir. Bu türbin tasarımı için en ideal kiriş uzunluğu 10 cm olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16. Farklı kanat kiriş uzunluğu (C) değerlerindeki türbinlerin Güç – Rüzgar hızı ilişkisi

Bir bölgenin rüzgar enerjisi potansiyelinin belirlenmesinde, bölgeden toplanan verilerin işlenmesi yoluyla elde edilen istatistiksel bilgiler kullanılır. Bu amaç için kullanılan istatistiksel yöntemler arasında en yaygın kullanılanlar; Rayleigh ve Weibull dağılım fonksiyonlarıdır. Rayleigh dağılım fonksiyonu, frekans dağılımı hesabı için sadece ortalama hıza ihtiyaç duyan bir dağılım fonksiyonu olduğu için kullanımı daha kolaydır. Fakat Weibull dağılım fonksiyonu, Rayleigh dağılım fonksiyonuna oranla daha iyi bir hassasiyet derecesine sahiptir.

Bu çalışmada kullanılan Weibull dağılımı fonksiyonu, daha düşük hata yüzdesine sahip olduğu için rüzgar enerjisi konusundaki çalışmalarda çok kullanılan bir yöntemdir. Belli bir bölgede toplanan rüzgar verilerinin işlenmesi yoluyla elde edilen Weibull dağılım parametreleri kullanılarak, herhangi bir rüzgar hızının frekansı konusunda iyi bir tahminde bulunmak mümkündür. Bir bölgede rüzgarın herhangi bir hızda esme sıklığını gösteren, Weibull olasılık yoğunluğu fonksiyonudur. Buna rüzgar hızı frekansı adı verilir. Rüzgar hızını ifade eden V rastgele değişkeninin Weibull dağılımına sahip olması durumunda, bu rastgele değişkenin birikimli dağılım fonksiyonu (5.1) numaralı eşitlik ile verilmektedir[15].

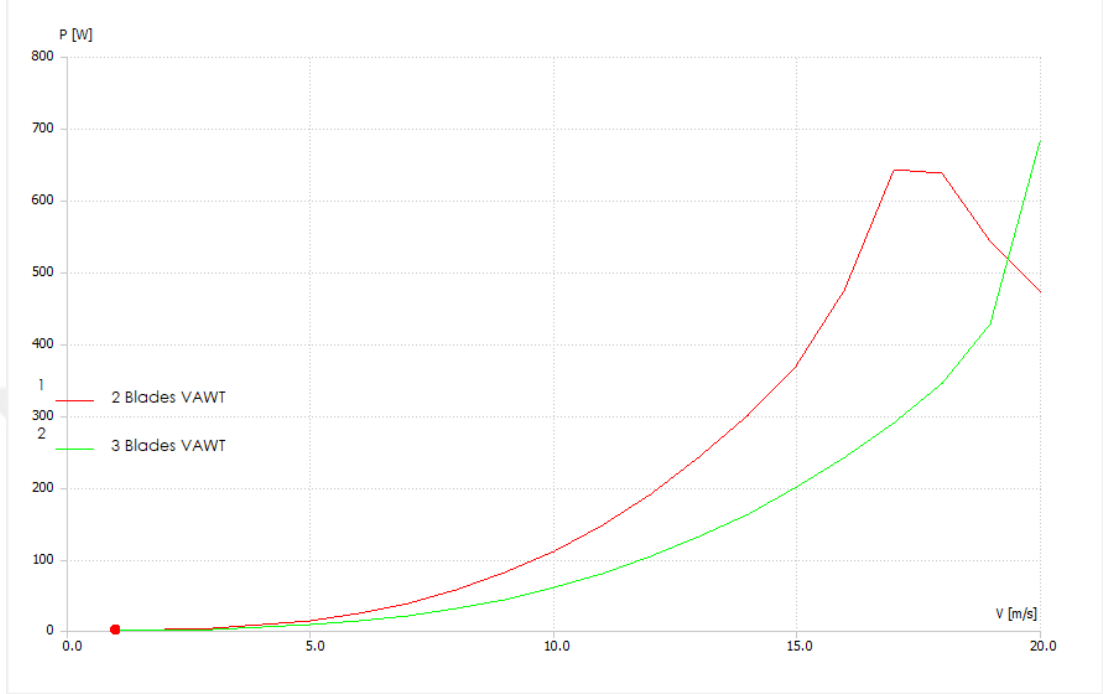
$$F(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (5.1)$$

(5.1) numaralı eşitlikte yer alan k ve c parametreleri sırasıyla konum ve ölçek parametrelerini göstermekte olup bilinmeyen bu parametreler, ilgili bölgedeki rüzgar hızı verisine dayalı olarak çeşitli istatistiksel yöntemlerle tahmin edilebilmektedir. Literatürde, farklı bölgelerdeki rüzgar hızı verilerini kullanarak bu verilere Weibull dağılımının uyumunu araştıran ve bilinmeyen k ve c parametrelerini ilgili bölge için tahmin eden birçok çalışma bulunmaktadır. Ozay ve Çelikleş tarafından yapılan çalışmada; Alaçatı, Çeşme, İzmir bölgesinden elde edilmiş rüzgar hızı verisinin Weibull dağılımına uygun olduğu gösterilmiş ve k ve c parametrelerinin tahmini değerleri sırasıyla 2.05 ve 9.16 m/s olarak bulunmuştur[15].

QBlade yazılımında bu parametrelerin girilmesi ile türbinlerin yıllık enerji üretimleri kWh olarak bulunmuştur. Bu değerler her bir türbin için Tablo 5.2.'de en sağdaki kolonda verilmiştir. Tablo incelendiğinde H090R45C05 kodlu türbinin yıllık enerji üretimi 1012 kWh olarak, H090R45C10 kodlu türbinin yıllık enerji üretimi 886 kWh'den fazla olmaktadır. Sonuç olarak bu bölge için H090R45C05 kodlu türbin daha uygun olmaktadır.

Şekil 5.17.'de yükseklik ($H=90$ cm), yarıçap ($R=45$ cm) ve kiriş uzunluğu ($C=15$ cm) aynı fakat farklı kanat sayılarına (2 ve 3 kanatlı) sahip dikey eksen rüzgar türbinlerinin Güç – Rüzgar Hızı ilişkisi gösterilmektedir. Bu türbin tasarımı

için en ideal kanat sayısının 2 olduğu görülmektedir. QBlade yazılımı Çeşme – İzmir için, 2 kanat sayısına sahip türbinin yıllık enerji üretimini 860 kWh olarak, 3 kanat sayısına sahip türbinin yıllık enerji üretimini 471 kWh olarak hesaplamıştır.



Şekil 5.17. Farklı kanat sayısına sahip türbinlerin
Güç – Rüzgar hızı ilişkisi

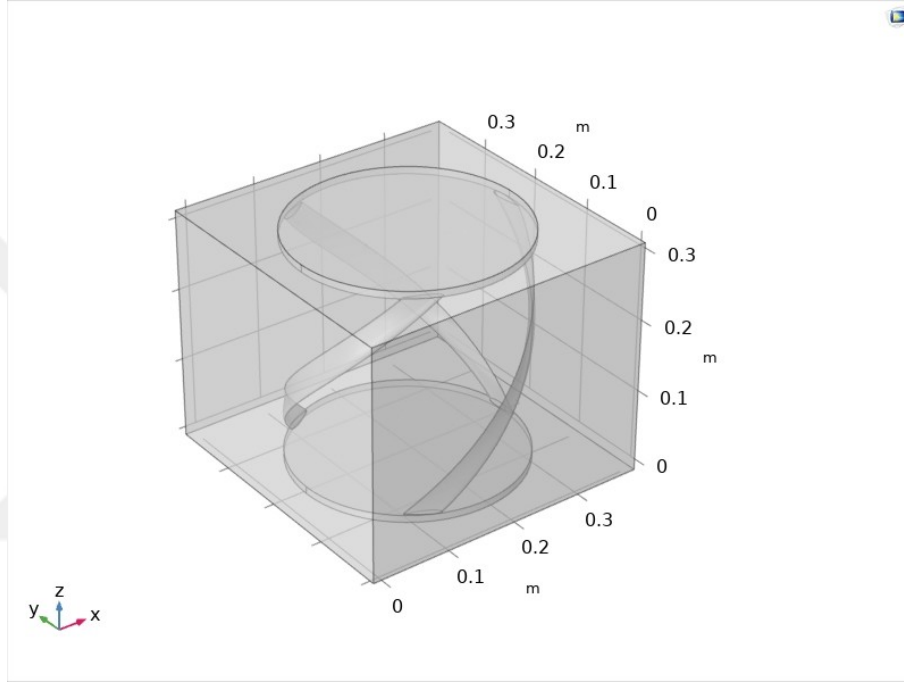
6. GORLOV TÜRBİNİ İMALATI

6.1. Gorlov Türbin Kanatlarının Yapısal Analizi

Bir rüzgar türbini tasarımında, enerji dönüşümünün en önemli halkası olan türbin kanatlarının tasarımı önemli bir yer tutmaktadır. Türbin kanatları tarafından rüzgardaki kinetik enerjinin kayıpsız alınması, türbinden elde edilecek verimi önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle türbin kanatlarının, rüzgardan en büyük enerjiyi alacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Bir rüzgar türbini kanat tasarımında ilk yapılması gereken, tasarım devirlilik sayısı seçimidir. Genel olarak tasarım devirlilik sayısının, 6 – 8 değerleri arasında seçilmesi önerilmektedir. En iyi tasarım devirlilik sayısı, türbin kanat profil şekline ve türbin kanat sayısına bağlıdır. Bu nedenle en iyi tasarım devirlilik sayısının 6 – 8 arasında seçilmesi genel bir kural değildir. Rüzgar türbini kanadı tasarımı için en iyi kanat profil boyunun, profil giriş hattı ile kanat dönme düzlemi arasındaki açı olan bağlama açısının ve kanat profil boyuna bağlı olarak profil alt ve üst kalınlıklarının hesaplanması gerekir. Yüksek rüzgar hızlarında türbin kanatlarının dayanımı, rüzgar türbini rotorlarının üretiminde dikkate alınması gereken en önemli konudur. Eğer bu konu yeterince dikkate alınmaz ise sonuçlar çok ağır olabilir. Yüksek rüzgar hızlarında, önlem alınmaması durumunda, türbin kulesinde ve özellikle kanatlarda mukavemet problemleri ortaya çıkabilir. Bunun sonucunda türbin elemanlarında büyük şekil değiştirme ve hatta kırılma meydana gelebilir. Türbin kulesini zorlayan yükler, kule ve özellikle türbin kanatlarına etki eden rüzgar kuvvetinden kaynaklanır. Türbin kanatlarına, rüzgar kuvveti ve ayrıca kanatların türbin eksenine etrafında dönmesinden kaynaklanan atalet kuvvetlerinin teğetsel ve normal bileşenleri etki eder. Türbin kulesi ve kanatlarında bu kuvvetler, eğilme gerilmeleri ile normal gerilmeler oluşturur. Bu gerilmelerin, türbin kanatları imalatında kullanılan malzemenin güvenli gerilme sınırını aşması durumunda kırılma ve eğilme gibi hasarlar oluşmaktadır.

Burada Comsol Multiphysics yazılımında, bir hava akış alanına yerleştirilen bir Gorlov türbin kanatları, farklı hızlarda güçlü rüzgarlara maruz bırakılınca türbin kanatlarında oluşan şekil değiştirmeyi gösteren bir model geliştirildi. Bu model, kanatların etrafındaki akışı ve akışkan yükü nedeniyle yapısal yer değiştirmeyi

çözmektedir. Bu model iki ana bölümden oluşmaktadır: ilk önce Serbest bir akış hızı ile türbin kanatları etrafındaki hava akışının çözümü yapılmıştır ve sonra akışkan yükünün neden olduğu türbin kanatlarının şekil değiştirmesinin incelenmesi yapılmıştır. Daha sonra, Alüminyum ve yapısal çelik gibi sünek malzemeler için Von Mises kriterine göre kırılma riski araştırılmıştır. Şekil 6.1.'de görüldüğü gibi daha önce Solidworks yazılımında hazırlanan üç kanatlı Gorlov türbin çizimi, "Import" komutu ile Comsol yazılımına aktarılmıştır.

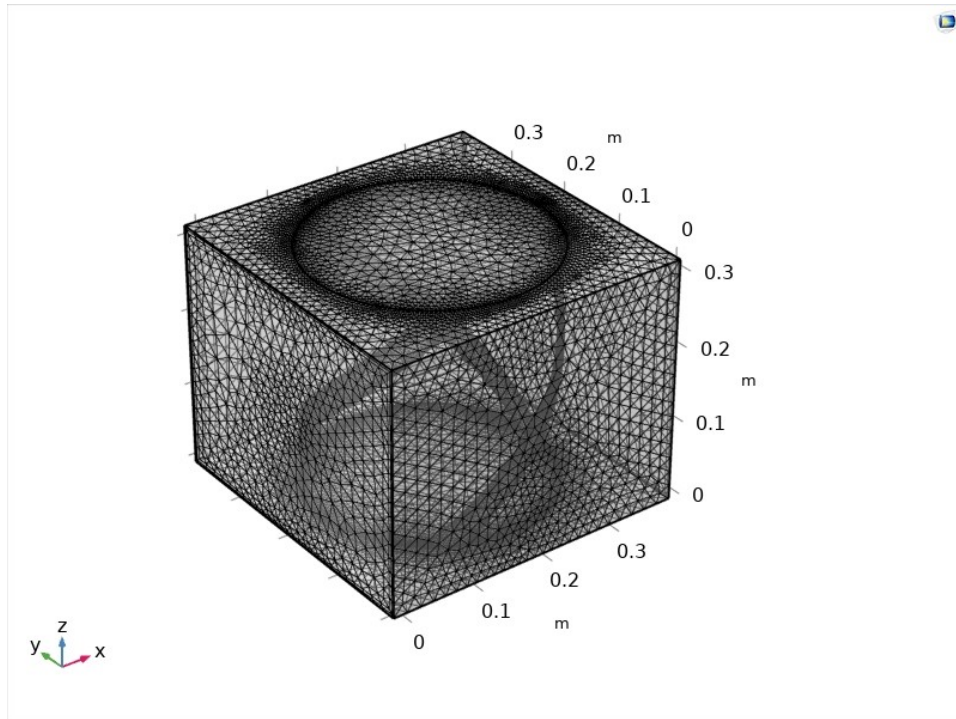


Şekil 6.1. Comsol yazılımına türbin çiziminin aktarılması.

Hazırlanan modelde türbin kanatları, tüm eksen boyunca hareket etmekte serbesttir ve sadece akışkan kuvvetlerine maruz kalır. Modelde, Akışkan Yapısı Etkileşimi (Fluid-Structure Interaction) çoklu fiziksel eşleştirmesi kullanılırken, akışkan kuvvetleri otomatik olarak yazılım tarafından uygulanır. Türbin kanatları, rijit olduğu varsayılan türbin gövdesine tutturulmuştur. Rijitlik, türbin alt ve üst gövde uçlarına bir Sabit Sınırlama (Fixed Constraint) verilerek uygulanır. Türbin kanatları daha sonra 0.3 m uzunluğunda, 0.3 m genişliğinde ve 0.3 m yüksekliğinde, bir rüzgar tünelinin bir bölümünü temsil eden kübik bir hacime yerleştirilir. Bu Küpün yanıl, üst ve alt duvarları ile türbin kanatlarının yüzeyi, duvar sınır koşulu

olarak belirlenirken, küpün sol ve sağ duvarları, rüzgarın yatay doğrultu boyunca eşit bir şekilde aktığı giriş ve çıkış olarak ayarlanır.

Comsol yazılımında hazır olarak bulunan Akışkan-Yapı Etkileşimi (Fluid-Structure Interaction) modülü, yapısal tepki ile çevresindeki akışkan akışının birleştiği ortak bir çoklu fiziksel problemler sınıfıdır. Akışkan akışı ve yapısal şekil değiştirme arasındaki etkileşim genel olarak iki yönlüdür. Akışkan, yapı üzerine dış bir yük uygular ve bu da yapısal bileşenlerin şekil değiştirmesine yol açar. Tersine, yapısal bileşenlerin hareketi veya şekil değiştirmesi, akışkan akışının yönünü değiştirir. Akışkan ve katı cisimler arasındaki etkileşimin türüne bağlı olarak, Akışkan-Yapı Etkileşimi (Fluid-Structure Interaction) problemleri, tek yönlü veya iki yönlü birleşmiş problemler olarak ayrılabilir. Akışkan ve yapısal mekanizma arasındaki etkileşim, iki alan arasındaki arayüz sınırları üzerinden belirlenir. Akışkan ve katı alanlar arasındaki iki özdeş çift (Coupling), iki fizik arasındaki çoklu fiziksel birleşimi içermek üzere Akışkan-Yapı Etkileşimi'nde (Fluid-Structure Interaction) seçilir. Bu nedenle Comsol Multiphysics yazılımında yapılan modelde, Çoklu fizik (Multiphysics) bölümünde Bağlantı tipi (Coupling Type), Yapı üzerine akışkan yükü (Fluid loading on structure) olarak seçilmiştir.

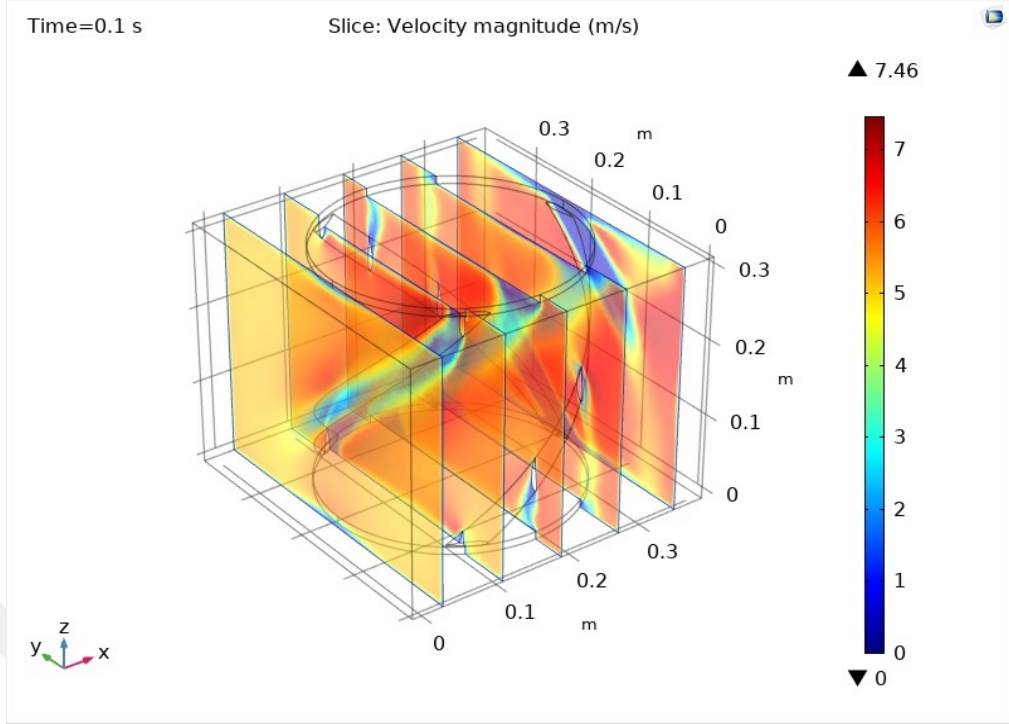


Şekil 6.2. Comsol yazılımında türbin kanatlarının ağ dağılımı.

Şekil 6.2.'de gösterildiği gibi, modelde Normal eleman boyutuna sahip Fizik kontrollü ağ (Physics-controlled mesh) seçilmiştir. Ayrıca Ağ, eğilen Türbin kanatları içindeki gerilimi bulmak için Türbin kanatları çevresinde en yoğun olacak şekilde yapılandırılmıştır. Düşük sayıdaki ağ (mesh) dağılımı büyük hata ile hesaplama yapabilir, ancak yüksek sayıdaki ağ (mesh) hesaplama süresini artırabilir. Bu nedenle modelde, Türbin kanatlarına yakın yerlerde yüksek yoğunlukta ağ dağılımı uygulanmıştır.

Bu çalışmada, türbin kanatları ve gövdesi; deniz, otomobil ve uçak uygulamalarında çok kullanılan Alüminyum ASTM 5083 alaşımından yapılmıştır. Alüminyum ASTM 5083 alaşımının malzeme özellikleri; 20 °C'de Yoğunluk $\rho = 2.66 \text{ g / cm}^3$, Çekme Dayanımı = 290 MPa, Akma Dayanımı = 145 MPa, Young modülü, $E = 70.3 \text{ GPa}$, Poisson oranı, $\mu = 0.33$ 'tür[16].

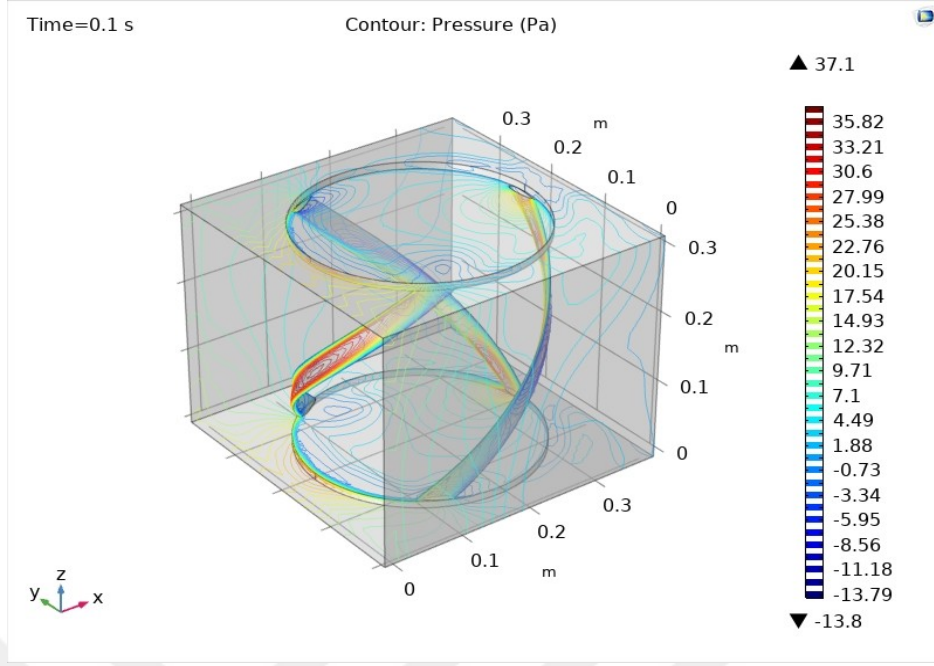
Bu çalışmada, türbin kanatları ve akışkan arasındaki etkileşimi analiz etmek için $t=0.1$ saniye süre bağımlı bir çalışma yapılmıştır. Model, 5 m/s akış hızı için, türbin kanatlarının etrafındaki akışı ve akışkan yükü nedeniyle yapısal şekil değiştirmeyi çözer. Daha sonra model, akışkan yükünün neden olduğu türbin kanadının deformasyonunu araştırır.



Şekil 6.3. Comsol yazılımında türbin kanatları etrafındaki hız dağılımı.

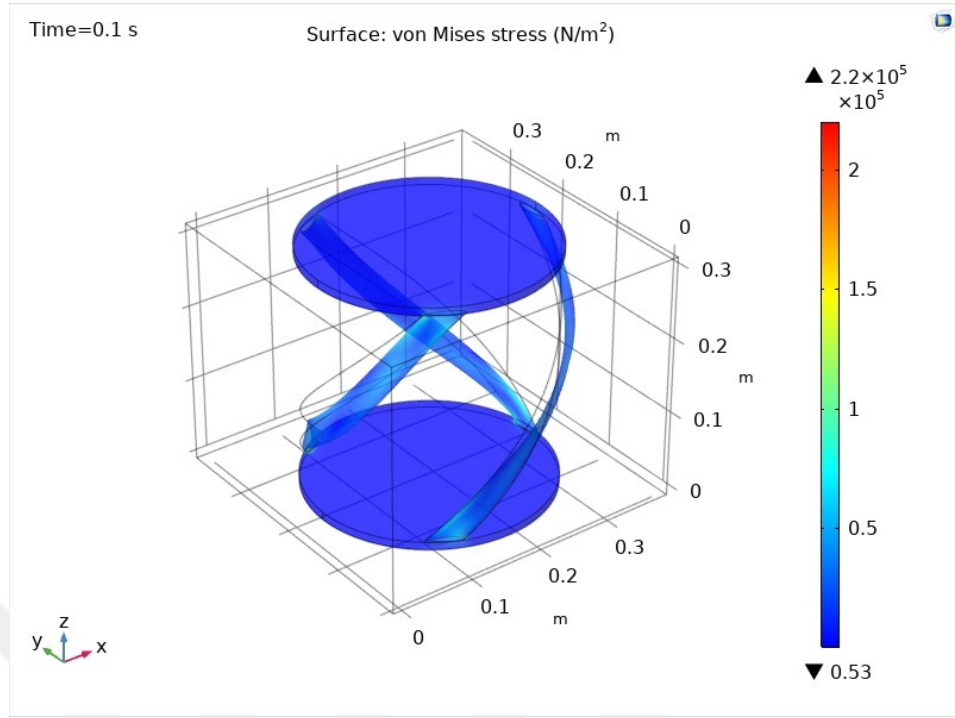
Şekil 6.3.'de, rüzgar giriş hızı 5 m/s için türbin kanatları etrafındaki akışkan hızının büyüklüğünü $t=0.1$ s'de göstermektedir. Maksimum hız yaklaşık 7.46 m/s'dir. Ana akış yolu ve türbin kanatları etrafındaki türbülans akışı açıkça görülmektedir.

Şekil 6.4.'te, zaman $t = 0.1$ s'deki çevre akışından dolayı Türbin kanatları etrafındaki basınç dağılımını göstermektedir. Maksimum göreceli basınç, yaklaşık 37.1 Pa olur ve Türbin kanatlarının ucuna en yakın noktada meydana gelir.



Şekil 6.4. Comsol yazılımında türbin kanatları etrafındaki basınç dağılımı.

Şekil 6.5.'te, Türbin kanatları etrafındaki zaman $t = 0.1$ s'deki von Mises gerilimini göstermektedir. Akışkan basıncı nedeniyle türbin kanallarının orijinal yapısı eğilir. Türbin kanatlarının akışkan yükü nedeniyle deforme olmuş şekli, Şekil 6.5.'te açıkça görülmektedir. En büyük yer değiştirme, Türbin kanatlarının üst köşesinde meydana gelir. Bununla birlikte, maksimum von Mises gerilimi küçüktür, yaklaşık 2.2×10^5 N/m²'dir. Bu, Türbin kanatlarının dayanımının, Türbin kanatlarını etkili bir şekilde rüzgar akışından koruduğunu gösterir. Von Mises gerilimi, belirli bir malzemenin, şekil değiştirmeye uğrayıp kırılacağını belirlemek için kullanılan bir değerdir. Çoğunlukla metaller gibi sünek malzemeler için kullanılır. Von Mises gerilim kriteri, yük altında bulunan bir malzemenin von Mises gerilmesinin, basit gerilim altında aynı malzemenin gerilim sınırına eşit veya daha büyük olması durumunda, malzemenin şekil değiştireceğini belirtir. Mevcut akış hızında Türbin kanatlarındaki akışkan yükü, Türbin kanatları tasarımını etkileyecek kadar önemli değildir. Alüminyum 5083 Alaşımı için akma dayanımı, Türbin kanatlarının kırılmadan sağlam bir şekilde çalışacağını düşünecek kadar büyüktür. Türbin kanatlarında en büyük gerilme, Türbin kanatlarının gövdeye bağlandıkları sabit bölgeye en yakın noktada meydana gelir.



Şekil 6.5. Türbin kanatları üzerindeki von Mises gerilimi dağılımı.

6.2. Gorlov Türbin Kanatlarının İmalatı

İmalat için, Comsol yazılımında analizini yaptığımız alüminyum ASTM 5083 malzeme serisi kullanılmıştır. Gorlov Türbini Helisel yapısı nedeniyle imalat açısından işlemesi oldukça zor bir yapıdır. Bu nedenle standart 3 eksen CNC Dik İşleme Merkezi tezgahında imalatını yapmak pek mümkün değildir. Kanat profilini işlemek için, 4 eksen cnc divizör veya 5 eksen cnc tezgahlar kullanılmalıdır.

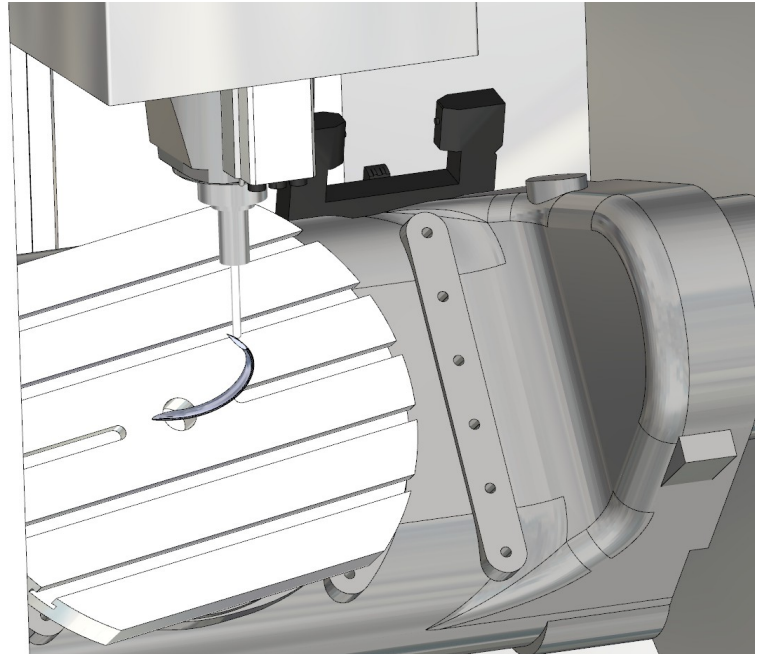
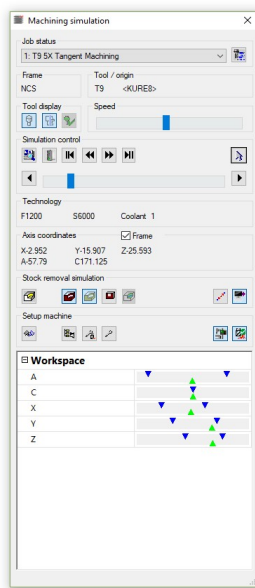
Bu projedeki ilk prototip kanat profilleri, Hermle CNC 5 eksen tezgahı ve Hypermill 5 eksen yazılımı kullanılarak imal edilecektir.

Seri üretime geçilmesi durumunda uygulanması gereken metod, kanat profillerine uygun kalıpcılık tekniğinin kullanılarak imal edilmesidir. Burada ki amaç, maliyetleri minimize ederek, hızlı ve standart üretim yapmaktır.

Şekil 6.6 da kanat formunu işlemek için kullanılan CNC 5 eksen Hermle C250 model tezgah görülmektedir. Şekil 6.7 de ise, daha önce Solidworks CAD (Bilgisayar Destekli Üretim) tasarım programında çizimi yapılan kanat formunun, Hypermill CAM (Bilgisayar Destekli İşleme) programı ile işlenmesi esnasında bir bölüm gösterilmektedir.

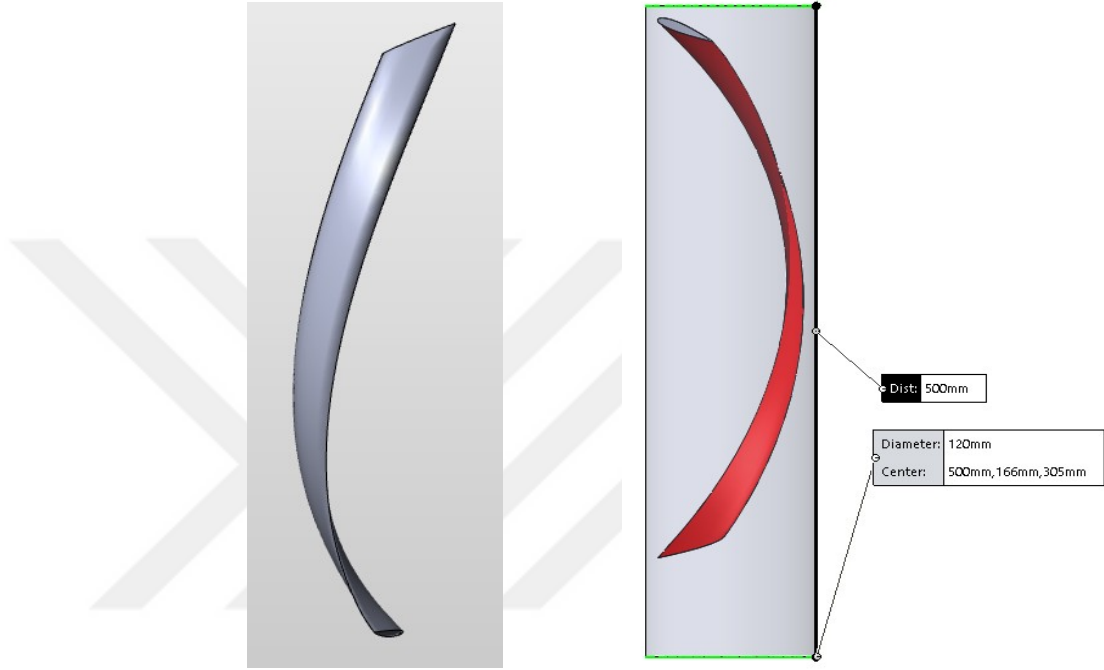


Şekil 6.6 CNC 5 eksen tezgahı (HERMLE C250).



Şekil 6.7 CNC 5 eksen tezgahı üzerinde kanat formu işleme.

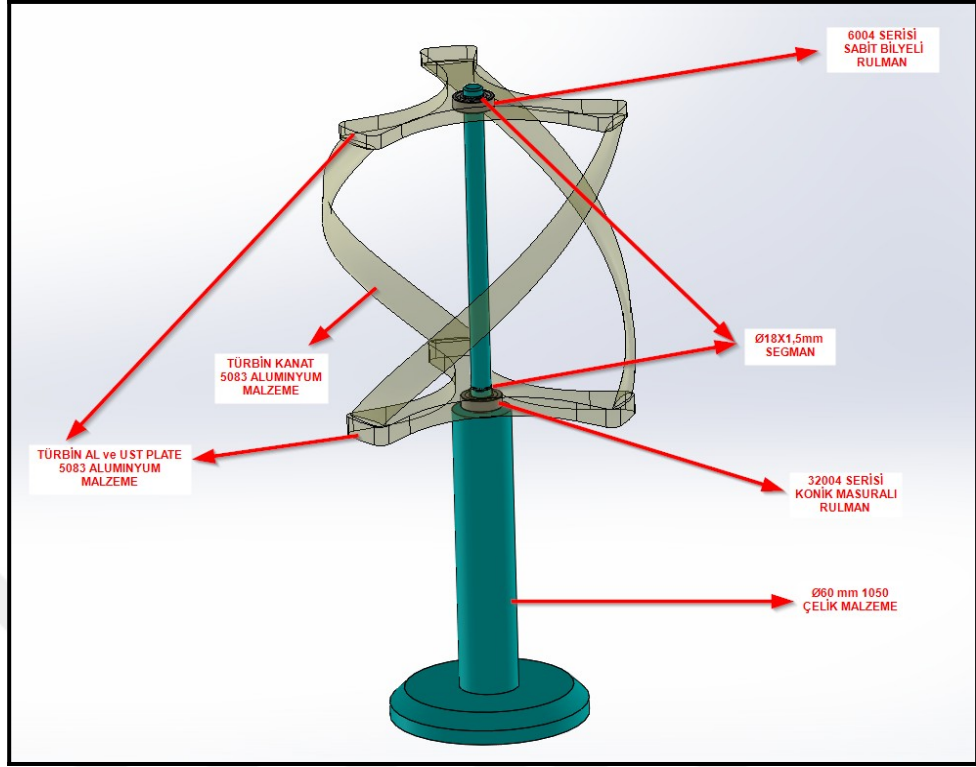
İmalat için kullanılan alüminyum blok, silindirik olarak kanat profilinin her bir adeti için ayrı olarak temin edilmiştir. İmalatı yapılacak olan ölçüler, daha önce hesaplamaları ve analizi yapılan ölçüler baz alınarak oluşturulmuştur. Silindirin ölçüleri her bir kanadı kapsayacak ve işleme esnasında ki CNC tezgaha bağlama şekli düşünülerek paylı olarak temin edilmiştir. Silindirin ölçüleri Şekil 6.8 de gösterilmiştir. (silindir çapı : 120 mm , silindir boyu : 500 mm dir.)



Şekil 6.8 Kanat profili ve alüminyum kaba silindir blok.

Daha önce belirlediğimiz değerler (**Tablo 5.1. Gorlov Türbin Tasarım Değerleri**) doğrultusunda aynı kanat profilinden 3 adet işlenerek Gorlov Türbin kanatlarımız imal edilecektir. Kanat profil imalatı bittikten sonra 3 kanadın bir araya getirilmesi için, yine CNC tezgah yardımıyla alt ve üst bağlama parçalarının imalatı yapılarak kanatların bu profiller vasıtası ile birbirlerine tek parça olacak şekilde montajı yapılır. Tüm bu sabitleme işlemini bitirdikten sonra yapılacak son işlem ise, kanat profili üzerine gelen rüzgarın oluşturduğu kuvvet ile dönmesinin sağlanmasıdır. Bunun için, tek parça haline getirilen ve artık birlikte hareket etme kabiliyeti kazanmış türbin kanatlarının, bir mil ile rulmanlar vasıtası ile yataklanması gerekmektedir. Bu şekilde türbin, üzerine gelen rüzgar kuvvetinin oluşturduğu, döndürme momenti etkisi ile enerji üretmeye başlayacaktır.

Şekil 6.9 da Türbin prototip üretimi için gerekli olan malzemeler ve montaj şekli gösterilmiştir.



Şekil 6.9 Türbin prototip üretim modeli

Şekil 6.10 da ise tasarım kriterleri baz alınarak 3D Printer ile üretilen nihai ürün modeli görülmektedir.



Şekil 6.10 3D Printer türbin prototipi

7. SONUÇLAR

Rüzgar türbininin rotor kanatları, küçük rüzgar türbini sistemlerinin performansını ve yararlarını artırmak için tasarlanmıştır. Bu çalışmada önerilen tasarım, yüzey basınç dağılım özellikleri nedeniyle NACA0018 kanat profiline sahip türbin kanatlarını içerir. Bu kanat profili, rüzgar türbinlerinin düşük hızlarda performansını artırır. Rotor kanat geometrisi incelenmiştir ve QBlade yazılımında tasarım geliştirilmiştir. Yapılan tasarıma ve simülasyonlara dayanarak aşağıdaki sonuçlara varılır:

Farklı rüzgar hızları için rotorun torku değişken kanat sayısı ile incelenmiştir. Kanat sayısının daha yüksek olduğu türbinlerin düşük rüzgar hızı koşullarında daha iyi tork ile çalıştığı görülmektedir. Tork, türbinin kendi kendine çalışmaya başlaması ve bağımsız bir sistem olarak çalışması için önemlidir. Çok sayıda kanatın dezavantajı, üretilen yüksek çekme kuvvetleridir. Rüzgar türbini durumunda, kendi kendine başlama yeteneğinin sınırlandırılması, helisel Gorlov tipi rotor kanadı tasarımının kullanılması ile aşılabılır.

Kanat sayısı, rüzgar türbini kanat uç hızını etkiler. Bu çalışmada seçilen üç kanat, kararlı güç katsayısı elde etmek için en uygun değerdir.

Kaldırma katsayısını CL , arttırmak için optimize edilmiş boyutlara sahip düzgün tasarlanmış rotor kanadı kullanılabilir.

Bu çalışmada sunulan kanat tasarımı için, CL/CD oranı, hücum açısının 5 ile 10 arasında değerleri için en yüksek değerine ulaşılabilir.

Bir rüzgar türbininin ürettiği güç, belirli bir zamanda rotor kanatları tarafından kaldırılan / yükseltilecek hava kütlesiyle orantılı olduğu için, kaldırma katsayısındaki artış ile, güç üretimi artar.

Yarıçap (R) ve kiriş uzunluğu (C) aynı fakat farklı yükseklik (H) değerlerindeki kanatlara sahip dikey eksen rüzgar türbinleri için, QBlade

yazılımında Güç – Rüzgar Hızı ilişkisi incelendiğinde; kanat yüksekliği arttıkça Türbin gücünün arttığı görülmüştür.

Yükseklik (H) ve giriş uzunluğu (C) aynı fakat farklı yarıçap (R) değerlerindeki kanatlara sahip dikey eksen rüzgar türbinleri için, QBlade yazılımında Güç – Rüzgar Hızı ilişkisi incelendiğinde; Türbin çapı arttıkça Türbin gücünün arttığı görülmüştür. H ve D aynı oranda artmış olmasına rağmen, aynı kanatlara sahip olan türbinin çapının artması Güç'te daha fazla artış sağlamıştır.

Ayrıca Comsol Multiphysics yazılımında, bir hava akış alanına yerleştirilen bir Gorlov türbin kanatları, farklı hızlarda güçlü rüzgarlara maruz bırakılınca türbin kanatlarında oluşan şekil değiştirmeyi gösteren bir model geliştirildi. Bu model ile yapılan analizler sonucunda; mevcut akış hızında Türbin kanatlarındaki akışkan yükü, Türbin kanatları tasarımını etkileyecek kadar önemli olmadığı görülmüştür. Alüminyum 5083 Alaşımı için akma dayanımı, Türbin kanatlarının kırılmadan sağlam bir şekilde çalışacağını düşünecek kadar büyüktür.

Analizleri yapılan türbin prototip imalatı, formunun helisel yapıda olması sebebiyle tüm eksenleri aynı anda ve birlikte çalışabilen (simultane) 5 eksen cnc tezgah kullanılarak yapılabilir. Prototip üretimi yapıldıktan sonra, gerekli enerji üretiminin sağlanıp sağlanmadığı, hesaplanan değerlere yaklaşıp yaklaşmadığı laboratuvar şartlarında test edilir. Yakın değerler olması durumunda ise artık seri üretime geçilebilir. Hem maliyeti düşürmek hemde hızlı üretilebilmek için en uygun metod ise kalıpcılık tekniği kullanılarak yapılan imalattır.

Bu tezin son aşamasında tasarımı ve hesaplamaları yapılan Gorlov Türbininin prototipi, 3D printer vasıtasıyla üretilmiştir. Rüzgarın temsilen oluşturulduğu düzenekte, üzerine gönderilen hava akımı ile dönmesi sağlanmıştır. Dolayısı ile projemiz sadece teorik olarak kalmamış, tasarım kriterleri baz alınarak prototip üretimi yapılmış ve seri üretime hazır hale getirilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Paraschivoiu, I. Wind Turbine Design. Polytechnic International Press, Montreal, Canada, 2002.
2. Sutherland, H. J., Berg, D. E., Ashwill, T. D. A Retrospective of VAWT Technology. Sandia Report, SAND2012-0304, 2012.
3. Casini, M. Small Vertical Axis Wind Turbines for Energy Efficiency of Buildings. Journal of Clean Energy Technologies, Vol. 4, No. 1, 2016.
4. Gorlov, A. M. Development of the helical reaction hydraulic turbine. Final Technical Report, The U.S. Department of Energy, 1998.
5. Gorlov, A. M. Unidirectional helical reaction turbine. U.S. Patent No. 5,451,137. U.S. Patent and Trademark Office, 1995.
6. Islam, M., King, D., Fartaj, A. Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(4), 1087-1109, 2008.
7. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, www.mgm.gov.tr.
8. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, www.yegm.gov.tr.
9. Marten, D., Wendler, J. QBlade Guidelines v0.6, Technical Report, Technical University Berlin, Germany, 2013.
10. Marten, D., Wendler, J., Pechlivanoglou, G., Nayeri, C.N., Paschereit, C.O. Qblade: An Open Source Tool for Design and Simulation of Horizontal and Vertical Axis Wind Turbines. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. Volume 3, Special Issue 3: ICERTSD 2013, 264-269, 2013.
11. Drela, M., Giles, M. Viscous-Inviscid Analysis of Transonic and Low Reynolds Number Airfoils, AIAA Journal Vol.25, No.10, 1989.
12. Deperrois, A. XFLR5 Analysis of foils and wings operating at low Reynolds numbers, www.xflr5.com/xflr5.htm, 2009.
13. Marten, D. QBlade Guidelines v0.9, Technical Report, Technical University Berlin, Germany, 2015.
14. Marten, D. QBlade Guidelines for Lifting Line Free Vortex Wake Simulations v0.95, Technical Report, Technical University Berlin, Germany, 2016.
15. Ozay, C. ve Celiktas, M. S. Statistical analysis of wind speed using two-parameter Weibull distribution in Alaçatı region. Energy Conversion and Management, 121, 49-54, 2016.

16. ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM Handbook Committee, 1990.
17. Demir, F.N., “Rüzgar Türbinleri”, Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2007
18. Yükselen, M.A., UCK 351 Aerodinamik Ders Notları, Erişim tarihi: 05.03.2018



ÖZGEÇMİŞ

Ahmet ÖZEKES

Makine Mühendisi

Doğum Tarihi : 28/12/1969
GSM : 0 533 715 27 82
E-Mail : ahmet@mtmmuhendislik.com.tr

İŞ TECRÜBESİ

DOĞUŞ VANA VE DÖKÜM SANAYİ LTD.ŞTİ.....1995-2002

www.dogusvana.com.tr

DOĞUŞ VANA, akış kontrol sistemleri ve otomatik kontrol vanaları konusunda yerli üretim yapan deneyimli ve tecrübeli bir üreticidir.

Görev : Üretim müdürü (Product manager)

MTM MÜHENDİSLİK SAN TİC. LTD. ŞTİ.....2002- devam ediyor

www.mtmmuhendislik.com.tr

MTM MÜHENDİSLİK, kalıp ve hassas üretim masterları ve fikstürleri konusunda imalatının yanı sıra , sektörde teknik eleman yetiştirmek üzere uygulamalı eğitimler ve danışmanlıklar vermektedir.

Position : Firma sahibi (Company owner)

9 Eylül University – Makina Mühendisliği Bölümü.....2006-2009

Görev : Öğretim görevlisi

Konu : Kalıplılık tekniği ve ileri düzey talaşlı üretim teknikleri seminer programları

Ege Üniversitesi – Makina Mühendisliği Bölümü.....2009-2013

Görev : Öğretim görevlisi

Konu : Kalıplılık tekniği dersi

EĞİTİM DÜZEYİ 9 Eylül Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü

UZMANLIK

İleri düzey Solidworks (CAD) yazılım bilgisi

İleri düzey Hypermil 5X&3X(CAM) yazılım bilgisi

İleri düzey Unigraphics (CAD/CAM) yazılım bilgisi

İleri düzey kalıp üretim ve modelleme bilgisi

İleri düzey talaşlı imalat ve kesici takım, CNC tezgah programlama eğitmenliği

İleri düzey bilgisayar program (Word,Excel,Power Point vs) ve donanım bilgisi

DİL SEVİYESİ

İNGİLİZCE Okuma - Yazma (B2-UPPER INTERMEDIATE)
Konuşma (B1-INTERMEDIATE)